FEBRUAR 2005 · € 6,90 (D/A)

DEUTSCHE AUSGABE DES SCIENTIFIC AMERICAN

Spektrum DER WISSENSCHAFT

> BSE und kein Ende

> Diamagnetische Levitation

> Ursprung der Sesshaftigkeit

> Dinosaurier und der Weltbrand

> ESSAY: Homosexualität

www.spektrum.de



EVOLUTION

Leben Viren?

Die Zellparasiten sind eigenständiger als gedacht

D6179E
13,50 sFr/Luxemburg 8,– €



Reinhard Breuer
Chefredakteur

Leben oder Nichtleben – das ist die Frage

Wird über Viren berichtet, ist es in der Regel nichts Gutes. Kein Wunder: Die bekanntesten bedrohen zumeist Leib und Leben, wie etwa das Influenzavirus, dem wir die Grippe verdanken, oder das HI-Virus, die Ursache von Aids. Das Problem ist ein nur bedingt wirksamer oder fehlender Impfschutz.

Grippeviren raffen jährlich allein in Deutschland 6000 bis 8000 Menschen dahin – ein stiller Krieg mit etwa so viel Toten wie im Straßenverkehr. Jeden Herbst beschwören die Medien das Gespenst einer neuen Pandemie herauf. Dann werden Erinnerungen wach, etwa an die »Spanische Grippe« von 1918/19, bei der nach neuesten WHO-Schätzungen bis zu 50 Millionen Menschen umkamen. Wer über 60 Jahre ist, zählt zur Risikogruppe und sollte sich impfen lassen. Doch ob die Impfung wirklich nützt, hängt auch vom richtigen Impfstoffmix ab. Der Erreger wandelt sich nämlich so rasch, dass bis zur Impfung schon wieder neue Virusvarianten aufgetaucht sein können.

Bei Aids gar ist auch nach 20 Jahren Forschung eine Schutzimpfung gegen das HI-Virus noch in weiter Ferne. Das Robert Koch-Institut schätzt in Deutschland 43 000 HIV-Infizierte bei 2000 Neuinfektionen pro Jahr. Weltweit ist ihre Gesamtzahl nach dem letzten UN-Bericht auf 39,4 Millionen gestiegen.

Neue Hoffnungen bieten womöglich so genannte DNA-Impfstoffe, die derzeit für mehrere Virenerkrankungen entwickelt werden: Sars, Ebola, aber auch Aids und Grippe. Das Konzept ist bestechend: Diese Vakzinen enthalten nicht mehr Oberflächenproteine des Erregers, die sich rasch ändern können, sondern essenzielle Stücke ihres Erbguts mit nichtveränderlichen Proteinen. DNA-Impfstoffe werden seit einem Jahrzehnt intensiv untersucht (siehe SdW 10/1999, S. 52). Inzwischen scheint man sich der Anwendungsreife zu nähern. Zumindest Mäuse sind damit bereits erfolgreich gegen Grippeviren immunisiert worden – nun aber gegen alle. Für HIV werden in Europa erste klinische Studien vorbereitet. In den USA steht der erste DNA-Impfstoff kurz vor der Zulassung. Er richtet sich gegen das West-Nil-Virus – allerdings bei Pferden.

Viren spielen in der Geschichte des Lebens offenbar aber nicht nur die Rolle eines lebensfeindlichen Schmutzeffekts. Vielmehr sind sie, wie unsere Titelgeschichte schildert, aktivere Mitspieler der Evolution als bislang angenommen. Die HI-Viren bekommen aus dieser Perspektive einen fatalen Sonderstatus, als »womöglich die einzigen biologischen Entitäten, die so rasch entstehen, dass wir ihre Evolution in Echtzeit verfolgen können« (S. 32).

Pisa und kein Ende, sondern ein Anfang: Als neue Rubrik starten wir heute »Junge Wissenschaft«, dafür entfällt künftig »Wissenschaft im Unternehmen«. »Junge Wissenschaft« soll jungen Menschen den Zugang zu naturwissenschaftlichen Themen öffnen – mit Aufgaben, die auch ein Oberstufenschüler »packen« kann. Selbst ältere Semester könnten versucht sein, ihren persönlichen Wissensfundus zu testen. Probieren Sie's (S. 70)!



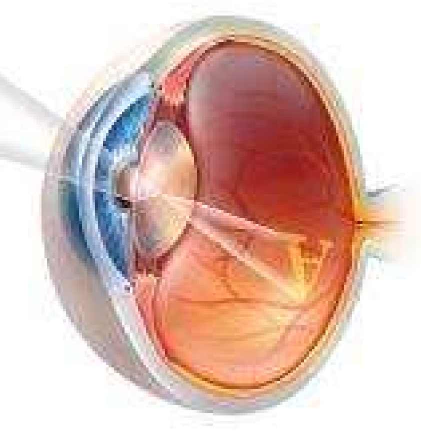
INHALT

FEBRUAR 2005

Titelbild: Ein Viruspartikel scheint sich hier aus unbelebter Materie zu materialisieren – Symbol für den wissenschaftlichen Streit, ob Viren echte Lebewesen sind

Titelbild: Bryan Christie Design

Die auf der Titelseite angekündigten Themen sind mit ▶ gekennzeichnet



MOLEKULARE MEDIZIN

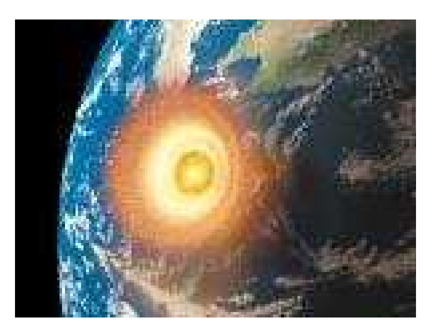
Klare Sicht durch die Augenlinse

Für eine glasklare Augenlinse stellen Zellen ihre Lebensfunktionen fast ganz ein. Rätselhaft ist noch, wie sie ihren Beinahe-Selbstmord steuern

PHYSIK

Stabil in der Schwebe

Seit den 1930er Jahren ist eine einfache Methode bekannt, mit der man Gegenstände stabil im Magnetfeld schweben lassen kann – doch erst jetzt finden die Forscher dafür auch praktische Anwendungen



ERDGESCHICHTE

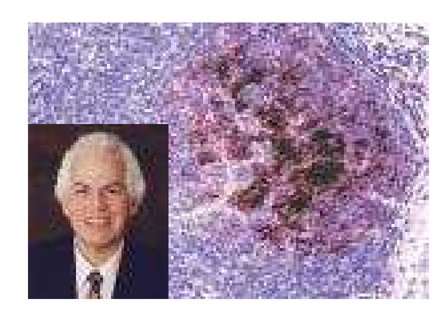
Der Tag, an dem die Erde brannte

Der Asteroideneinschlag, der die Dinosaurier vernichtete, setzte auch eine verheerende Welle von Flächenbränden in Gang. Fast alle Wälder der Erde gingen in Flammen auf

NEOLITHIKUM

Freundliche Übernahme

Feste Siedlungen, Ackerbau und Viehzucht – die Erfindung der Landwirtschaft in der Jungsteinzeit kam einer Revolution gleich. Doch verlief sie wohl weniger dramatisch als lange angenommen



BSE

Frühtests für Rinderwahnsinn

Nobelpreisträger Stanley B. Prusiner plädiert für lückenlose Tests mit empfindlicheren Verfahren, da das Verhalten der BSE-Erreger noch immer Überraschungen birgt

NEUE RUBRIK JUNGE WISSENSCHAFT

Molekulares Spiegelkabinett

Auch im Reich der Moleküle kann es wichtig sein, zwischen links und rechts zu unterscheiden. Bei der jüngsten Chemie-Olympiade mussten Schüler zeigen, wie gut ihnen das gelingt



Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

SPEKTRUM-PLUS.DE
ZUSATZANGEBOT NUR FÜR ABONNENTEN



Einstein und der Kreiselkompass

Warum wandte sich der Physiker von der Ausarbeitung seiner Allgemeinen Relativitätstheorie kurz ab, um den Magnetismus in einem Eisenstab zu untersuchen?

ZUGÄNGLICH ÜBER WWW.SPEKTRUM-PLUS.DE NACH ANMELDUNG MIT ANGABE DER KUNDENNUMMER

Verheißung von Stammzellen
Dezember 2004

Fragen über Fragen
Bei dem Thema Stammzellen stellen sich viele Fragen: Wann genau beginnt der Mensch? Ist eine bewusste Abtreibung etwas anderes als die Tötung einer embryonalen Stammzelle?

Normal ist, dass sich bei einer Schwangerschaft die befruchtete Eizelle erst in der Gebärmutter einnisten muss, damit ein Mensch heranwachsen kann. Der Mensch hat die befruchtete menschliche Eizelle in die Nährlösung einer Petrischale gebracht. Ist das normal?

W. J. Fraidling, Bad Wörishofen

Weit reichende Erkenntnisse von der Stammzellforschung
Stammzellforschung ist heute so wichtig wie vor hundert Jahren die Grundlagenforschung in der Chemie. Damals hätte ein Ethikrat heutiger Prägung ein Moratorium gefordert, weil durch die Chemie auch Giftgase und Sprengstoffe möglich werden. Trotzdem wird kein vernünftiger Mensch bestreiten, dass die Chemie der Menschheit mehr Vor- als Nachteile gebracht hat.

Stammzellen sind einerseits eine große Verheißung, andererseits stellen sie ein nicht unerhebliches medizinisches Risiko dar.

Ausgangspunkt mancher Krebserkrankungen sind nach neueren Erkenntnissen zumindest pluripotente adulte Stammzellen, die im ungefähren Verhältnis von 10^{-4} in unseren Körpergeweben existieren und für Reparaturen zuständig sind. Fast immer funktioniert dieser Mechanismus perfekt, aber manchmal eben auch nicht. Deshalb ist Stammzellforschung ein bisher viel zu wenig beachteter Aspekt der Krebsforschung. Von ihr sind mindestens ebenso weit reichende Erkenntnisse zu erwarten wie von der Forschung um das therapeutische Klonen.

Prof. Hans E. Müller, Braunschweig

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

▲ Die untere Verdickung im Innern (rot) dieses Keims ist die Quelle für embryonale Stammzellen.

Nach uns die Eiszeit
Leserbriefe, November 2004

Herrn Dr. Wedekinds Argument ist nicht neu. Richtig ist, dass die 15-Mikrometer-CO_2-Bande fast gesättigt ist und bei weiterer CO_2-Konzentrationszunahme nur noch wenig zum Treibhauseffekt beitragen kann. Unrecht hat er, wenn er den CO_2-bedingten Anteil zum Treibhauseffekt allein der 15-Mikrometer-CO_2-Bande anlastet. In Wirklichkeit sind es CO_2-Absorptionslinien zwischen neun und elf Mikrometern, die durch die anwachsende CO_2-Konzentration direkt zum Treibhauseffekt beitragen.

Hinzu kommt, dass die Erde ihr Abstrahlungsmaximum als »Schwarzer Strahler« bei zehn Mikrometern hat – entsprechend der Temperatur von 300 Kelvin (Planck'sche Strahlungsverteilung und Wien'sches Verschiebungsgesetz). Ich untersuche seit 1993 klimarelevante Spurengase mit hochauflösender FTIR-Messtechnik und kann mit Sicherheit behaupten, dass diese Linien existieren und bei der Messung von zum Beispiel NH_3 sehr störend im Spektrum vorhanden sind.

Ich behaupte nicht, dass eine globale Erwärmung unausweichlich auf uns zukommt. Physikalischer Fakt ist aber, dass die atmosphärischen CO_2-Banden mit zunehmender Konzentration stärker absorbieren. Und die CO_2-Konzentration ist messbar angestiegen und steigt weiter.

Prof. Hans J. Hellebrand, Potsdam

Streit um das Ende der Dinosaurier
Leserbriefe, November 2004

Dr. Heißigs Frage nach der Ursache dafür, dass Dinosaurier ausgestorben sind, nicht aber die »nahe verwandten« Krokodile, lässt sich nach heutigem Kenntnisstand plausibel erklären: Als wechselwarme Tiere können erwachsene Krokodile problemlos mehrere Jahre ohne Nahrung überleben. Dies gilt auch für ein mehrmonatiges oder sogar mehrjähriges Klimachaos nach einem Meteoriteneinschlag. Größere Warmblüter haben diese Fähigkeit nicht, und mittlerweile spricht einiges dafür, dass Dinosaurier Warmblüter gewesen sind.

Es entbehrt daher nicht einer gewissen Ironie, dass ebenfalls in der Novemberausgabe ein Hauptartikel über Flugsaurier als »warmblütige Pioniere der Lüfte« erschienen ist.

Falls sich bestätigt, dass dieser Befund auch für Dinosaurier im Allgemeinen gilt, wäre die Frage von Dr. Heißig damit von selbst beantwortet.

Jörg Michael, Hannover

Dunkle Energie bremst Computer aus
Forschung aktuell, Oktober 2004

Wenn man die Thesen von Krauss und Strakmann weiterdenkt, kommt man zu folgenden Vermutungen:
1. Es gibt in diesem Universum eine absolut größte Zahl, nämlich die, die mit den verfügbaren Informationsbits so gerade noch dargestellt oder gelesen werden kann.
2. Diese Zahl hat keinen festen Wert, sondern sinkt mit dem Alter des Universums.
3. Am Ende des Universums ist diese Zahl genau 0.
4. Am Anfang des Universums war sie unendlich.

Hintergrund: Die natürlichen Zahlen sind abzählbar unendlich – in der Theorie –, wenn aber die Energie des Universums nur eine endliche, wenn auch riesige Menge von Zähloperationen hergibt, zwingt diese Endlichkeit auch zur Erkenntnis der Endlichkeit der natürlichen Zahlen. Und da diese Energie sinkt, sinkt damit auch die absolut mögliche Menge von Zähloperationen und damit die Möglichkeit, beliebig große Zahlen darzustellen.

Schlimmer: Würde heute ein Dämon diese größte Zahl berechnen und speichern, gäbe es nicht nur niemanden mehr, dem genug Energie übrig bliebe, um sie zu lesen, ihr Speichermedium würde zudem von der Hawking-Strahlung irgendwann zerstört werden.

Tomas Schweigert, Bergisch-Gladbach

Magnetantrieb für Raumfahrzeuge
Dezember 2004

Es ist immer wieder ärgerlich, wenn wie in diesem Aufsatz auf S. 83 die Schwerelosigkeit in einer Umlaufbahn als ein Zustand erklärt wird, bei dem sich zwei Kräfte, die Schwerkraft und die Zentrifugalkraft,

TSUNAMI-KATASTROPHE

Zur Flutkatastrophe in Südasien finden Sie Berichte unter **www.wissenschaft-online.de/tsunami**. Zudem ist der Artikel **»Die Bedrohung durch stille Erdbeben«** auf **www.spektrum.de** als Download frei erhältlich. Weitere Hintergründe zu Erdbeben bietet unserer Sonderheft **»Die unruhige Erde II«**. (Siehe auch S. 10/11)

gegenseitig aufheben. Würden sich Kräfte tatsächlich aufheben, wäre der betroffene Körper also kräftefrei, würde er geradlinig weiterfliegen und keinesfalls im Orbit bleiben.

Ein Körper befindet sich im Zustand der Schwerelosigkeit, wenn er in seiner Bewegung ohne jede Einschränkung der jeweils wirkenden Schwerkraft folgt, das heißt, er befindet sich sozusagen jederzeit im freien Fall.

Diese inzwischen allgemein akzeptierte Definition hat nicht nur den Vorteil, dass sie im Einklang mit der klassischen Mechanik steht, nach der eine Kreisbewegung, hier die Bewegung in einem Orbit, eine Kraft in Richtung des Zentrums voraussetzt, sie erlaubt darüber hinaus auch alle anderen Fälle der Schwerelosigkeit abzudecken wie zum Beispiel beim Fall im Fallturm und beim so genannten Parabelflug mittels Flugzeugen.

Dr. Manfred Zier, Ritterhude

Ein See als Seismograf

Dezember 2004

Interessant an diesem Beitrag ist auch ein Nebenschauplatz, der zum Nachdenken anregen könnte. Die beiden ältesten Erdbeben vor 14 610 und vor 13 960 Jahren erfolgten zeitgleich mit signifikanten Temperatursprüngen, wie δ^{18}O-Daten aus dem Grönlandeis ausweisen (NGRIP, S. J. Johnsen et al., 2004). Innerhalb kürzester Zeit versprangen die Temperaturen um 5 bis 7 Grad Celsius. Vor 14 610 Jahren aus den eiszeitlichen Temperaturen des Dryas 1 ins warme Bölling und vor 13 960 Jahren wieder zurück ins kalte Dryas 2. So exakt, dass ein Zufall nahezu ausgeschlossen werden kann.

Das Beben vor 9820 Jahren erfolgte dagegen weniger spektakulär am Ende der extremen Klimaturbulenzen und dem Beginn der relativ ruhig verlaufenden heutigen Warmzeit. Offenbar scheint es Wechselwirkungen zu geben zwischen den signifikanten Klimasprüngen (Dansgaard-Oeschger-Ereignissen) und geologisch-geophysikalischen Ereignissen, die bisher noch nicht oder noch nicht genügend bekannt sind und noch nicht ausreichend untersucht wurden. Es wäre also interessant zu wissen, ob auch anderswo auf der Erde zeitgleiche Ereignisse stattgefunden haben.

Hans-Jürgen Bobzien, Hamburg

Die Krux mit dem Sex

Leserbriefe, Oktober 2004

Prof. Gilbert, offensichtlich kein Botaniker, behauptet in seinem Leserbrief »Der Standard bei höheren Pflanzen ist Zwitter«.

Ob Buche oder Maiglöckchen – das so benannte Gewächs ist in Wirklichkeit ein ungeschlechtliches Individuum. Alle Pflanzen machen einen so genannten Generationswechsel zwischen geschlechtlich und ungeschlechtlich sich fortpflanzenden Generationen durch.

Bei Algen und Farnen vertreten noch getrennte Individuen die verschiedenen Generationen. Samenpflanzen (höhere Pflanzen) haben dagegen, stark vereinfacht ausgedrückt, die Geschlechtsgeneration auf wenige Zellen reduziert, die gleichsam als Parasit in der Blüte versteckt sind. Die eigentliche (makroskopisch erlebbare) Pflanze ist also immer die ungeschlechtliche und daher sexuell nicht differenzierte Generation.

Dr. Bruno Kremer, Köln

Erratum

Karthago – antikes Reich des Bösen? Dezember 2004

Beim Bildnachweis zur Karte auf S. 28 wurde ein falscher Name angegeben. Korrekt ist: Emde-Grafik nach: Ranger-Design / Jürgen Krüger, Universität Karlsruhe.

Die Redaktion

Briefe an die Redaktion …

… richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
D-69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: 06221 9126-729

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Christina Peiberg (kom. Ltg.), Sigrid Spies, Katharina Werle
Bildredaktion: Alice Krüßmann (Ltg.), Anke Lingg, Gabriela Rabe
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Oliver Gabriel, Marc Grove, Anke Naghib, Natalie Schäfer
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg, Tel. 06221 9126-711, Fax 06221 9126-729
Verlag: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 10 48 40, D-69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, D-69126 Heidelberg, Tel. 06221 9126-600, Fax 06221 9126-751
Verlagsleiter: Dr. Carsten Könneker
Geschäftsleitung: Markus Bossle, Thomas Bleck
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. 06221 9126-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. 06221 9126-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. 06221 9126-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Gerald Bosch, Dr. Markus Fischer, Dr. Rainer Kayser, Dr. Susanne Lipps-Breda, Daniel Stolte
Leser- und Bestellservice: Tel. 06221 9126-743, E-Mail: marketing@spektrum.com

Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft Verlagsgesellschaft mbH, c/o Zenit Pressevertrieb GmbH, Postfach 810680, 70523 Stuttgart, Tel. 0711 7252-192, Fax 0711 7252-366
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechungserhalt.
Konto: Postbank Stuttgart 22706708 (BLZ 600 100 70)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Hartmut Brendt, Tel. 0211 6188-145, Fax 0211 6188-400; verantwortlich für Anzeigen: Gerlinde Volk, Postfach 102663, D-40017 Düsseldorf, Tel. 0211 88723-76, Fax 0211 374955
Anzeigenvertretung: Berlin: Michael Seidel, Friedrichstraße 150, D-10117 Berlin, Tel. 030 61686-144, Fax 030 6159005; Hamburg: Siegfried Sippel, Burchardstraße 17/I, D-20095 Hamburg, Tel. 040 30183-163, Fax 040 30183-283; Düsseldorf: fs//partner, Stefan Schließmann, Friedrich Sültemeier, Bastionstraße 6a, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0211 862997-0, Fax 0211 132410; Frankfurt: Klaus-Dieter Mehnert, Eschersheimer Landstraße 50, D-60322 Frankfurt am Main, Tel. 069 242445-38, Fax 069 242445-55; Stuttgart: Dieter Drichel, Werastraße 23, D-70182 Stuttgart, Tel. 0711 22475-24, Fax 0711 22475-49; München: Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15/IV, D-80331 München, Tel. 089 545907-30, Fax 089 545907-24
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, D-40213 Düsseldorf, Tel. 0711 88723-87, Fax 0211 374955
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 26 vom 01.01.2005.

Gesamtherstellung: Konradin Druck GmbH, Leinfelden-Echterdingen

ISSN 0170-2971

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: John Sargent, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg, Vice President/Managing Director, International: Dean Sanderson

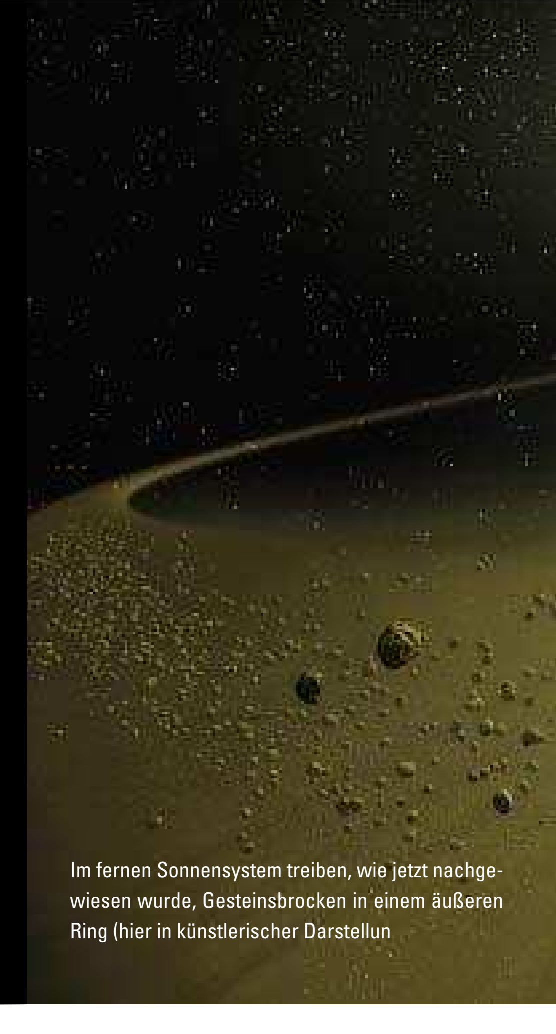
ASTRONOMIE

Sterne mit Trümmerscheibe

■ Den Anfang macht eine Staubwolke, die einen jungen Stern umgibt und sich unter der eigenen Schwerkraft allmählich verdichtet. Wegen der Rotation des Systems wird sie zunächst zu einer Scheibe abgeflacht. Die Teilchen darin kollidieren dann miteinander und ballen sich so im Laufe der Zeit zu größeren Klumpen zusammen, aus denen schließlich Planeten wie die Erde entstehen. Übrig gebliebene kleinere Brocken und Trümmer der Kollisionen sammeln sich in einer sekundären Scheibe – wie dem Asteroiden- und dem Kuiper-Gürtel.

Soweit das theoretische Bild der Entstehung eines Planetensystems. Wie gut es die Realität trifft, ließ sich bisher nicht sicher sagen. Außerhalb des Sonnensystems konnten die Astronomen nämlich nur beschränkte Schnappschüsse aus diesem Szenarium beobachten. Einerseits sahen sie sehr junge Sterne mit Staubscheiben, andererseits Gasriesen in fertigen Sonnensystemen.

Nun aber gelangen Forschern der Nasa neue, detailliertere Einblicke. Zum einen entdeckte das Hubble-Weltraumobservatorium eine geriffelte Staubscheibe mit ringförmigen Lücken um einen Stern, der mit 50 bis 250 Millionen Jahren schon ein Alter erreicht hat, in dem Frühstadien der Planetenbildung ablaufen sollten. Andererseits erspähten die Infrarotkameras des gleichfalls die Erde umkreisenden Spitzer-Teleskops bei sechs Sternen im Alter der Sonne, bei denen früher schon Gasplaneten nachgewiesen worden waren, eine sekundäre Scheibe aus Trümmern. Beides passt hervorragend zum theoretischen Bild. *(Nasa, 9.12.2004)*



Im fernen Sonnensystem treiben, wie jetzt nachgewiesen wurde, Gesteinsbrocken in einem äußeren Ring (hier in künstlerischer Darstellun

MATERIALFORSCHUNG

Nanotechnik-Linse nach Krakenart

■ Die Augen des Tintenfischs können Licht fünfmal so stark bündeln wie die des Menschen. US-Forscher haben das Tier deshalb zum Vorbild genommen, um aus Plastik eine ebenso scharf fokussierende Linse zu konstruieren. Sie setzt sich wie die der Kraken aus einigen 100000 extrem dünnen Schichten mit unterschiedlichem Brechungsindex zusammen. Traditionell bestehen technische Linsen dagegen aus einem einzigen durchsichtigen Material – gewöhnlich Glas. Je stärker sie Licht bündeln sollen, desto mehr muss ihre Oberfläche gekrümmt sein, was Abmessungen und Gewicht erhöht. Mit Nanoschichten kann dagegen sogar eine flache Scheibe fokussierend wirken, wenn der Brechungsindex zum Rand hin zunimmt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Jetzt hat ein Team um Eric Baer von der Case Western Reserve University in Cleveland (Ohio) 0,05 Millimeter dünne Plastikfilme erzeugt, die aus rund 6000 Lagen zweier unterschiedlich stark brechender Kunststoffsorten bestehen. Über den relativen Anteil der beiden Komponenten variierten die Forscher den Brechungsindex. Schließlich formten sie aus hundert solchen Filmen eine Kugel. Die Brennweite dieser künstlichen Linse war genauso kurz wie die des Krakenauges. Ein ähnlich stark fokussierendes Exemplar aus Glas hätte das vierfache Gewicht.

Die US-Forscher sehen eine Fülle technischer Anwendungen ihrer Nanotechnik-Linse bei Kameras, Teleskopen und Sehhilfen – auch weil das Material weich und biegsam ist, sodass sich der Brennpunkt einfach und schnell durch Dehnen oder Stauchen ändern lässt. *(Online-Nachrichten »Nature News«, 7.12.2004)*

◄ Das Auge eines Oktopus war Vorbild für die Konstruktion stark brechender Kunststofflinsen.

PHARMAKOLOGIE

Antibiotikum aus der Alge

■ Wissenschaftler an der Universität von New South Wales in Sydney haben einen neuen Typ von Antibiotikum gefunden und erfolgreich am Erreger der Cholera getestet.

Es handelt sich um Substanzen aus den Blättern der Rotalge *Delisea pulchra*, die zur Stoffklasse der Furanone gehören. Im Gegensatz zu herkömmlichen Antibiotika zerstören sie die Bakterien nicht. Sie verhindern nur die chemische Kommunikation zwischen ihnen, indem sie die Andockstellen für die Botenstoffe blockieren. Viele Bakterien sind aber auf diesen Informationsaustausch angewiesen. Erst wenn das Signal »Mindestmenge im Körper erreicht!« gegeben wird, produzieren sie jene Toxine, welche die schweren Krankheitssymptome auslösen – bei der Cholera etwa den Durchfall.

In einer Zeit, da Resistenzen gegen herkömmliche Antibiotika die Bekämpfung bakterieller Infektionen zunehmend erschweren, ist eine neue, unver-



DIANE MCDOUGALD, UNIVERSITY OF SOUTH WALES

▲ Antibakterielle Substanzen aus den Blättern der Rotalge *Delisea pulchra* hemmen die Kommunikation bei Cholera-Bakterien: Die Furanone (hier gelb fluoreszierend) können aus den Drüsenzellen extrahiert werden.

brauchte Waffe hochwillkommen. Diane McDougald und ihre Mitarbeiter in Sydney sind davon überzeugt, dass die Furanone aus der Rotalge auch gegen andere Bakterien wie die Erreger der Tuberkulose wirksam sind. Allerdings haben sie die Substanzen bisher nur im Labor getestet, Versuche an Mäusen sollen folgen.

(University of New South Wales, 8.12.2004)

WAHRNEHMUNG

Blinder ahnt Mimik

Schäden in der Sehrinde können genauso blind machen wie Zerstörungen im Auge. Allerdings erkennt das Gehirn in diesem Fall anscheinend trotzdem gewisse Aspekte des Gesehenen. Einen Beleg dafür lieferte jetzt ein Team um Alan Pegna von der Universität von Wales in Bangor. Es untersuchte einen Mann, der erblindet war, weil zwei Schlaganfälle seine Sehrinde fast völlig zerstört hatten. Obwohl der Patient die Gesichter auf 200 dargebotenen Fotos nicht wahrnehmen konnte, erkannte er mit einer Trefferquote, die deutlich höher lag als der Zufallswert, den emotionalen Ausdruck. Scans der Hirndurchblutung zeigten den wahrscheinlichen Grund dafür. Emotionen in den Gesichtern ließen eine Hirnregion aktiv werden, die als Amygdala (Mandelkern) bezeichnet wird. Ihre Aufgabe ist es, den emotionalen Gehalt sensorischer Informationen zu bewerten. Das geschieht anscheinend auch dann noch, wenn die Information selbst nicht mehr korrekt verarbeitet werden kann. *(Nature Neuroscience, 12.12.2004, doi: 10.1038/nn1364)*

GEOLOGIE

Blätter archivieren Gebirgsbildung

Wenn Wissenschaftler die einstige Höhe von Bergen bestimmen wollen, können sie jetzt eine neue Methode benutzen: Sie zählen die Poren auf der Unterseite fossiler Blätter. Durch diese so genannten Stomata nehmen Pflanzen Kohlendioxid auf, das sie für die Photosynthese benötigen. Weil die Luft in bergigen Höhenlagen dünn ist, gibt es dort weniger Moleküle des Gases. Um diesen Mangel auszugleichen, bilden die Blätter mehr Poren als im Flachland. Die Anzahl der Stomata ist also ein Indikator für die Höhe, in der die Pflanze wächst.

Die Geologin Jennifer McElwain am Field Museum in Chicago testete die Methode am Beispiel der Kalifornischen Schwarzeiche *(Quercus kelloggii)*, die in dem breiten Höhengürtel von 50 bis 2500 Metern über dem Meer gedeiht. Untersuchungen an heutigen Blättern aus bekannten Höhen ergaben eine Fehlermarge von nur 300 Metern. Außerdem zeigte McElwain an einer Sammlung bis zu 65 Millionen Jahre alter fossiler Blätter, dass die Methode auch rückwirkend verlässlichen Aufschluss über die Auffaltung und Erosion von Bergzügen gibt.

(Geology, 30.11.2004, S. 1017)

▼ In 400-facher Vergrößerung werden auf einem Eichenblatt die bohnenförmigen Stomata (Poren) für den Gasaustausch sichtbar. Ihre Zahl steigt mit der Höhe, in der die Pflanze wächst.



SEISMOLOGIE

Die Tsunami-Katastrophe

Dank seismischer Überwachung sowie moderner Computer- und Satellitentechnik ließen sich Ursache, Verhalten und Auswirkungen der verheerenden Flutwelle im Indischen Ozean akribisch dokumentieren – nur die Vorwarnung funktionierte nicht.

Von Gerhard Trageser

Am 26. Dezember ereignete sich kurz vor acht Uhr morgens Ortszeit unter dem Meeresgrund westlich der indonesischen Insel Sumatra ein Erdbeben der Stärke 9,0. Die resultierende Flutwelle löste die wohl größte Naturkatastrophe der jüngeren Menschheitsgeschichte aus – mit vermutlich mehr als 150 000 Todesopfern in den Küstenregionen und auf den Inseln des Indischen Ozeans.

Ursache war wie bei allen Erdstößen die ruckartige Verschiebung zweier großer Blöcke der Erdkruste. Vor dem Nordwesten Sumatras taucht an einer so genannten Subduktionszone – dem Sundagraben – die Indische unter die Birma-Platte ab. Gelegentlich verhakt sie sich dabei und steckt fest. Die Spannung steigt dann so lange, bis die Sperre aufbricht und die aufgestaute Energie plötzlich freigesetzt wird. Dann bewegt sich die wieder entriegelte Platte schlagartig um ein großes Stück weiter. Das geschah jetzt, wie die Geologen anhand der Stärke des Erdbebens und der Lage der Nachbeben schätzen, an einem insgesamt etwa 1200 Kilometer langen Stück des Sundagrabens.

Computersimulationen des Ereignisses ergaben, dass in der Umgebung des Bebenherds selbst, der 18 Kilometer unter dem Meeresboden liegt, die beiden Krustenblöcke beim ersten großen Erdstoß auf einer Länge von hundert Kilometern um bis zu zwanzig Meter aneinander entlangglitten. Am Meeresgrund war die Bewegung nicht mehr ganz so stark. Hier hob sich die Birmaplatte um bis zu fünf Meter und verrutschte seitlich um maximal elf Meter.

Dennoch reichte diese plötzliche Bodenbewegung aus, um die verheerende Monsterwelle auszulösen. Fachleute sprechen von Tsunami – ein Wort, das die Japaner geprägt haben, deren Inselstaat häufig von solchen Wellen heimgesucht wird. Wenn sich der Meeresboden ruckartig hebt, wirkt das wie eine Faust, die das Wasser plötzlich nach oben drückt. Kurzfristig entsteht eine Art Hügel, der jedoch, da Wasser nicht formstabil ist, sofort wieder absackt und auseinanderläuft. Die Erhebung bewegt sich dann ringartig nach allen Seiten als Welle davon.





DIGITAL GLOBE

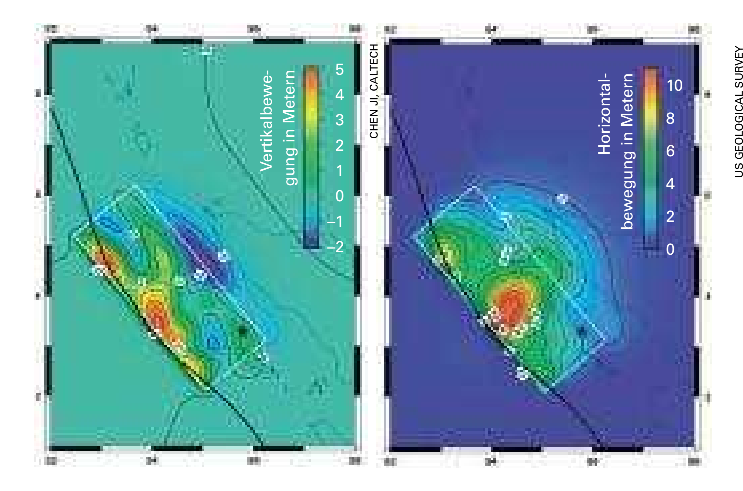
Erstmals konnten auch Satelliten den Verlauf einer Tsunami-Katastrophe dokumentieren. Allerdings waren die meisten nicht zur rechten Zeit am richtigen Ort, um das Anbranden der Welle selbst aufzunehmen. Sie lieferten lediglich nachträglich schockierende Bilder von den Verwüstungen. Nur der Satellit Quickbird der Firma Digital Globe erwischte den Zeitpunkt des Zurückflutens der ersten Welle bei der Stadt Kalutara an der Westküste Sri Lankas um 10:20 Uhr Ortszeit (unten). In dem folgenden Wellental wich die Wasserlinie kurzzeitig mehr als 300 Meter vom Strand zurück (oben).

Etwas Ähnliches passiert, wenn man einen Stein in einen Teich wirft. Allerdings hat der »Stein« hier einen Durchmesser von mehreren Dutzend Kilometern und der »Teich« eine Tiefe von fünf Kilometern. Entsprechend groß ist die Wellenlänge der Woge. Ein Tsunami unterscheidet sich deshalb völlig von dem kleinräumigen Kräuseln der Meeresoberfläche, das der Wind oder ein Sturm verursacht. Vielmehr schwappt wie in einem bewegten Tank ein riesiger Wasserkörper als Ganzes hin und her – mit der Geschwindigkeit eines Flugzeugs.

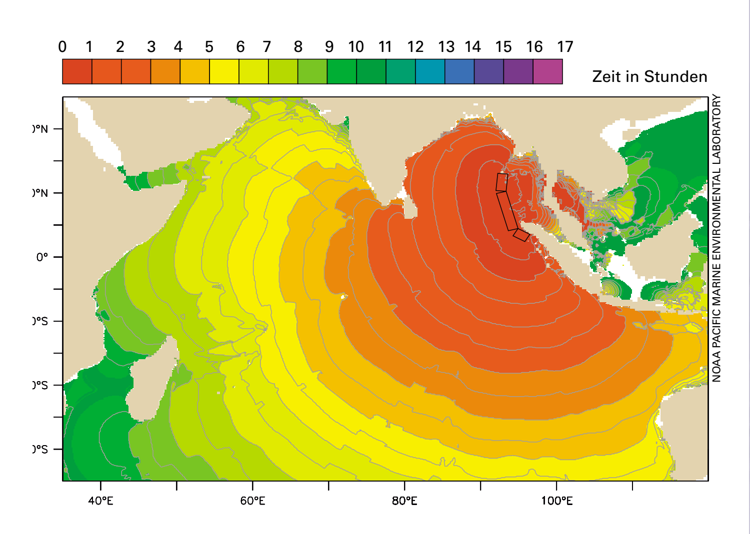
Das hat paradoxe Konsequenzen: Da sich synchron derart viel Wasser bewegt, muss die Welle nicht sehr hoch sein, um dennoch eine gigantische Energiemenge zu transportieren. Auf dem freien Meer ist sie deshalb kaum gefährlich, ja für ein Schiff, dem sie begegnet, praktisch nicht spürbar: Es wird nur unmerklich angehoben und wieder abgesenkt. Ihre Gewalt entfaltet die Welle erst, wenn ihre Front in flacheren Regionen in Küstennähe abgebremst wird. Das von hinten nachdrängende Wasser staut sie dann immer mehr auf, sodass sie Höhen von zehn Metern und mehr erreichen kann. Besonders fatal sind dabei flache, sanft abfallende Küsten, wie sie in den Touristenparadiesen am Indischen Ozean vorkommen. Das erklärt die enormen Verwüstungen und vielen Todesopfer.

Die Küste vor einem starken Tsunami schützen zu wollen ist praktisch aussichtslos. Den Menschen bleibt nur die rechtzeitige Flucht. Leider schlägt die Welle aber buchstäblich aus heiterem Himmel zu. Immerhin kann man die kurze Zeitspanne zwischen dem seismischen Nachweis des Bebens und dem Eintreffen der Woge für eine Vorwarnung nutzen. Im Pazifik, in dem öfter Tsunamis auftreten als im Indischen Ozean, existiert schon seit Jahrzehnten ein entsprechendes System. Im Indik soll es nun schnellstens aufgebaut werden – für die Hunderttausende jetzt gestorbener und verletzter Menschen zu spät.

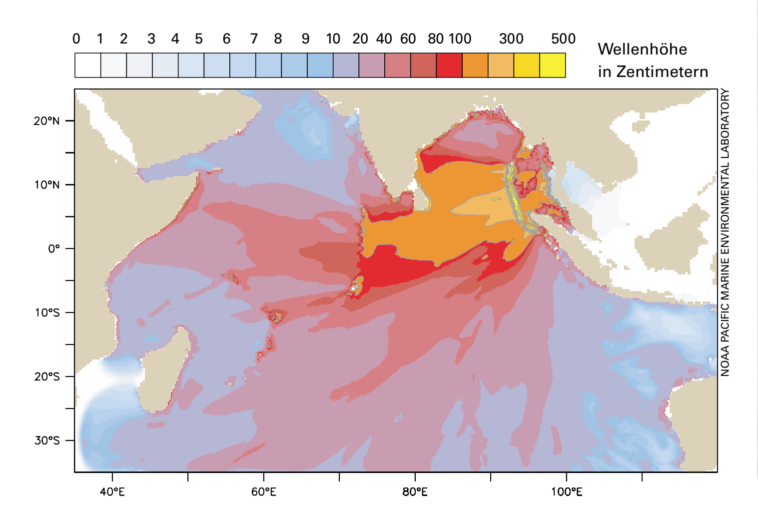
Gerhard Trageser ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.



Nach Modellrechnungen wurde der Meeresboden an dem Abschnitt der Plattengrenze, der an das Epizentrum des Bebens grenzt, um bis zu fünf Meter gehoben (links) und elf Meter horizontal versetzt (rechts).



Bei einer Geschwindigkeit von etwa 700 Kilometer pro Stunde erreichte die Tsunamiwelle nach etwa zwanzig Minuten Sumatra, nach drei Stunden Indien und nach acht Stunden Somalia am Horn von Afrika.



Auf dem freien Meer war die Tsunamiwelle maximal vier Meter hoch, an der Küste Sumatras erreichte sie dagegen mehr als zehn und selbst am Horn von Afrika noch vier Meter Höhe.

Der verheerende Erdstoß am 26. Dezember (Stern) und die Nachbeben ereigneten sich an einem Abschnitt des Sundagrabens, an dem die Indische Platte unter die Birma-Platte abtaucht.

PLANETOLOGIE

Mars überraschend jung und dynamisch

Vulkanausbrüche und fließende Gletscher – der Rote Planet war noch bis in die junge geologische Vergangenheit erstaunlich aktiv.

Von Thorsten Dambeck

Seit Dezember 2003 umkreist die High Resolution Stereo Camera (HRSC) an Bord der Esa-Sonde Mars Express den Roten Planeten und funkt dreidimensionale Farbansichten zur Erde. Mittlerweile hat der Orbiter schon ein Areal abgelichtet, das größer ist als Europa und Russland zusammen.

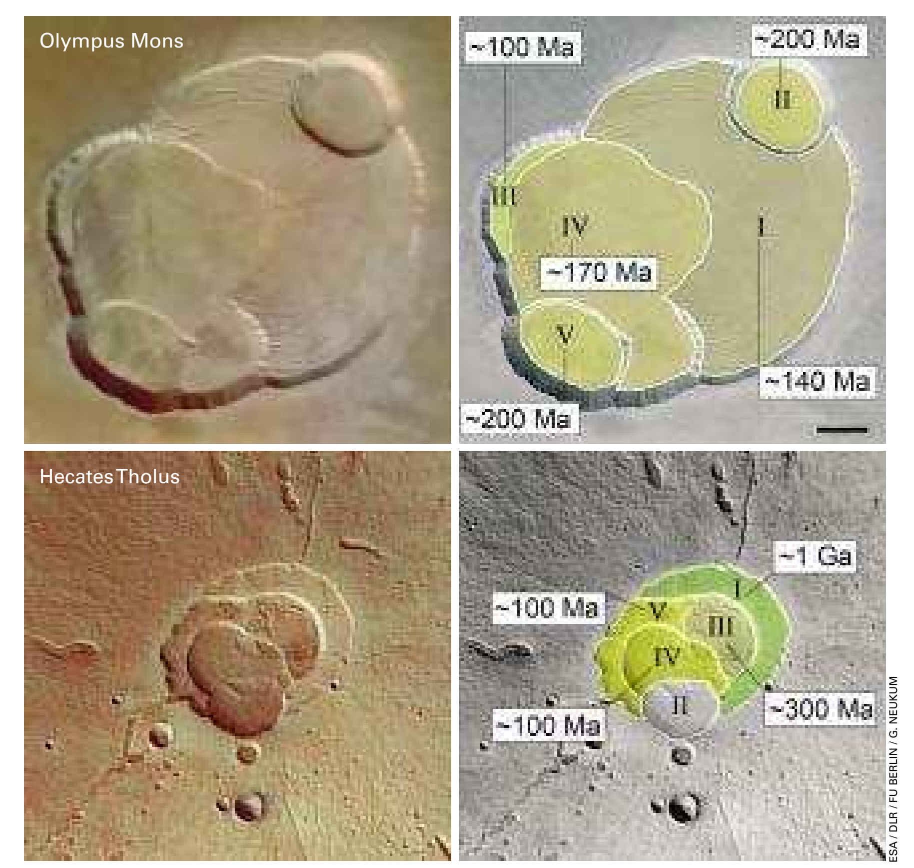
Zu den ersten Fotomotiven gehörten die Regionen Elysium und Tharsis, wo gewaltige Schildvulkane in den Marshimmel ragen. Diese Aufnahmen hat Gerhard Neukum von der Freien Universität Berlin, der den Einsatz der Kamera leitet, jetzt gemeinsam mit Kollegen ausgewertet und über die Ergebnisse berichtet *(Nature, 23. 12. 2004, S. 971)*. Demnach herrschte in beiden Regionen während der vergangenen 3,8 Milliarden Jahre immer wieder vulkanische Aktivität. Selbst in jüngster Vergangenheit gab es noch Ausbrüche, sodass die Feuerberge auf dem Mars – anders als bisher angenommen – wohl noch keineswegs erloschen sind. Zusammen mit Aufnahmen der US-Sonde Global Surveyor dokumentieren die HRSC-Bilder außerdem Spuren von Vergletscherungen, die gleichfalls noch bis vor Kurzem das Gesicht des Roten Planeten prägten.

Krater abzählen

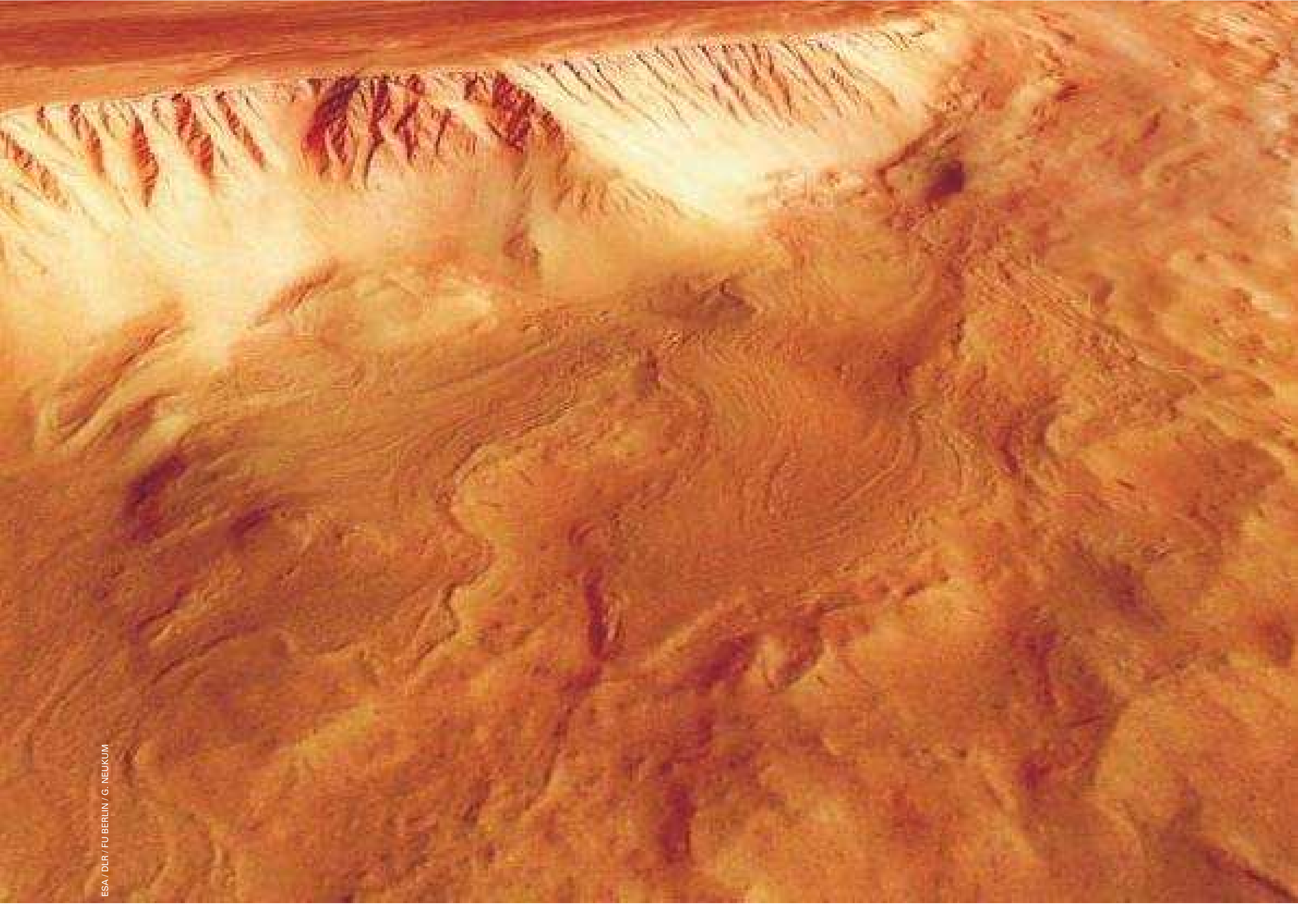
Neukum und seine Kollegen bestimmten das Alter ausgewählter Marslandschaften, indem sie abzählten, wie viele Krater welcher Größe darauf vorkommen. Je jünger eine Oberfläche ist, desto weniger kosmische Geschosse sollten darauf eingeschlagen sein. Ursprünglich hatten die Planetologen die Methode für den Mond entwickelt und sie anhand der radiometrisch bestimmten Alterswerte zur Erde transportierter Gesteinsproben geeicht. Aber nicht nur der Erdtrabant ist einem stetigen Bombardement durch Asteroiden und Kometen ausgesetzt. Deshalb eignet sich das Verfahren auch zur Datierung von Oberflächen anderer Körper im Sonnensystem – sofern dort keine starken Verwitterungs- und Erosionsprozesse die Einschlagspuren schnell wieder verwischen, wie das auf der Erde der Fall ist.

Allerdings kann man nicht davon ausgehen, dass der kosmische Kugelhagel in der Marsbahn exakt dem entspricht, der auf den Mond niederprasselt; schließlich bewegt sich der Rote Planet viel näher am Asteroidengürtel als die Erde und ihr Trabant. Deshalb mussten die Berliner Forscher anhand von Beobachtungsdaten und Modellrechnungen den spezifischen Strom kosmischer Geschosse für den Mars eigens abschätzen – was eine gewisse Unsicherheit in die Datierung bringt. Neukum veranschlagt den statistischen Fehler bei Oberflächen, die nicht älter als drei Milliarden Jahre sind, auf 20 bis 30 Prozent.

Sehr junge Regionen wurden in der Regel nur von kleineren Körpern getroffen, weil diese in viel größerer Zahl im Sonnensystem kreisen als die dicken Brocken. Für ihre Datierung benötigen die Forscher deshalb die Häufigkeit und Größenverteilung besonders kleiner Einschlagspuren. Mit dem hochauflösenden Kanal der HRSC und den Fotos vom Global Surveyor ließen sich nun erstmals Krater bis herunter zu fünf Metern Durchmesser erfassen. Das ermöglichte noch Altersbestimmungen im sehr kurzen Zeitbereich von wenigen Millionen Jahren.



Die Böden der Gipfelkrater von Olympus Mons, dem höchsten Vulkan auf Mars, sind überraschend jung. Das ergab jetzt eine Datierung anhand von Aufnahmen der High Resolution Stereo Camera (HRSC) an Bord der Esa-Sonde Mars Express (oben). Auch Hecates Tholus auf der gegenüberliegenden Seite des Planeten war noch bis vor 100 Millionen Jahren tätig. Die älteste Caldera bildete sich hier vor einer Milliarde Jahren.



Als die Forscher mit dieser Methode die Calderen fünf großer Schildvulkane datierten, erlebten sie eine Überraschung: Die Böden dieser Gipfelkrater erwiesen sich meist als geradezu blutjung. Calderen entstehen durch Einsturz eines Hohlraums in der unterirdischen Magmakammer, wenn der Druck des Deckgesteins zu groß wird. Bislang war vermutet worden, dass die vulkanische Aktivität auf dem Mars schon vor Langem – einem Zeitraum in der Größenordnung von Milliarden Jahren – im Wesentlichen zum Erliegen kam. In jüngerer geologischer Vergangenheit sollten allenfalls noch kleinere lokale Ausbrüche stattgefunden haben.

Doch die Neudatierung zeichnet nun ein anderes Bild: »Unsere Analyse zeigt, dass noch vor etwa 100 bis 200 Millionen Jahren vier der fünf untersuchten Vulkane in ihren Gipfelcalderen aktiv waren – und zwar in beiden Vulkanregionen«, erklärt Neukum. Auch einige Lavaströme an den unteren Flanken von Olympus Mons erwiesen sich als erstaunlich jung. Demnach trat dort vor 25 Millionen und in einem Fall sogar noch vor zwei Millionen Jahren flüssiges Vulkangestein aus.

Ebenso überraschend war ein anderer Befund: Marsvulkane bleiben offenbar um Größenordnungen länger aktiv als ihre irdischen Gegenstücke. »An den Flanken von Olympus Mons konnten wir Lavaströme datieren, die zwischen 3800 und weniger als 100 Millionen Jahre alt sind. Das umfasst rund achtzig Prozent des Planetenalters«, so Neukum. Ähnliche Beobachtungen machten die Forscher auch auf der gegenüberliegenden Marsseite am Vulkan Hecates Tholus in der Elysium-Region. Bei Erdvulkanen liegen zwischen erstem Ausbruch und Erlöschen in der Regel weniger als eine Million Jahre.

▲ Auch Gletscherströme prägten bis vor Kurzem noch die Marsoberfläche. Das belegen zum Beispiel zungenartige Ablagerungen an einem Steilhang an der Westseite von Olympus Mons (mitten und links im Bild). Sie enthalten so wenig Einschlagkrater, dass sie jünger als zwei Millionen Jahre sein müssen.

Spuren früherer Gletscher

Aber nicht nur Feuer hat noch bis vor Kurzem die Oberfläche des Mars geprägt, sondern auch Eis. Dieses zweite Ergebnis, das die Auswertung der hochaufgelösten HRSC-Bilder jetzt erbrachte, ist umso frappierender, als der Rote Planet noch bis vor ein, zwei Jahren als staubtrockene Wüste galt. Wenn überhaupt, dann sollte es höchstens vor sehr langer Zeit einmal Wasser dort gegeben haben. Jüngst zeigte sich allerdings bereits, dass die Polkappen keineswegs, wie bisher angenommen, vollständig aus gefrorenem Kohlendioxid bestehen und dass in weiten Bereichen des Bodens vermutlich auch heute noch ein unterirdischer Eishorizont existiert.

»Wir sehen glaziale Strukturen an vielen Stellen der Marsoberfläche, auch in gemäßigteren Breiten näher am Marsäquator«, erklärt Ralf Jaumann vom Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Berlin. »Das ist kein lokales Phänomen.« Spuren von Vergletscherungen finden sich außer in ▷

▷ den polaren Regionen zum Beispiel auch am 21 Kilometer hohen Olympus Mons, dem größten Marsvulkan. Seine Caldera liegt auf etwa zwanzig Grad nördlicher Breite. Am Fuß seiner westlichen Flanke erstrecken sich lappenartige Ablagerungen, die schon früher als Spuren von Vergletscherungen gedeutet wurden.

Mit den HRSC-Bildern ließ sich das nicht nur bestätigen; die Forscher konnten diese Strukturen nun auch datieren. Dabei stellten sie fest, dass es mehrere Vergletscherungsphasen gab. Die größten Ablagerungen stammen aus einer Zeit vor 130 bis 280 Millionen Jahren, kleinere Einheiten sind dagegen nur zwischen 20 und 60 Millionen Jahre alt. An einigen Orten finden sich sogar Spuren, die erst vor vier Millionen Jahren entstanden.

Schnee am Olymp?

Die Forscher schließen daraus, dass die Hänge von Olympus Mons noch bis vor Kurzem von Schnee- und Eismassen bedeckt waren, die episodisch wuchsen und wieder schrumpften. Manchmal stießen die Gletscher bis in die Niederungen vor und deponierten dort größere Mengen Gesteinsschutt. Neukum hält es für möglich, dass Vulkanhitze die Basis der Eisdecken schmelzen ließ, sodass sie abrutschten. Spuren solcher Vorgänge finden sich auch an den Flanken von Hecates Tholus.

Olympus Mons fällt an seiner Westseite fast senkrecht um mehrere Kilometer ab. An diesem Steilhang entdeckten die Berliner Forscher auf den HRSC-Bildern zungenartige Ablagerungen, die sie gleichfalls als Gletscher-Relikte deuten. Diese Formen müssen extrem jung sein: Sie weisen so wenig Einschlagkrater auf, dass sie mit der beschriebenen Methode nicht mehr zuverlässig datierbar sind. Entlang der Oberkante des Steilhangs hat Neukum in rund 7000 Meter Höhe mögliche Überreste von Schnee ausgemacht, die durch eine Staubschicht davor geschützt sein könnten, in der dünnen Marsatmosphäre zu sublimieren. Worum es sich wirklich handelt, sollen künftige Beobachtungen mit dem Radar und dem Bordspektrometer der Express-Sonde klären.

Den Datierungen zufolge zeigen sowohl die vulkanische Aktivität als auch die Vereisungen ein episodisches Muster. Das muss aber nicht heißen, dass beide Phänomene ursächlich zusammenhängen. Zwar könnte vulkanische Hitze Eisvorkommen im Untergrund geschmolzen haben. Das Wasser wäre dann an der Oberfläche ausgetreten und dort wieder gefroren. Als fließender Gletscher hätte es schließlich die heute sichtbaren Formen erzeugt.

Jaumann verweist jedoch auf Modellrechnungen des französischen Astrophysikers Jacques Laskar, wonach sich die Bahnparameter des Mars und die Neigung seiner Rotationsachse – wie bei der Erde – periodisch ändern. Vor allem die Achsneigung, die für die Jahreszeiten verantwortlich ist, schwankt demnach im Laufe einiger Millionen Jahre beträchtlich – deutlich stärker als bei unserem Planeten. Das könnte drastische Klimaschwankungen auslösen. In Phasen hoher Achsneigung hätten sich die polaren Eisvorkommen dann immer wieder großräumig in äquatornahe Regionen verlagert. »Mit den verbreitet auftretenden Gletscherspuren haben wir auf der Marsoberfläche vermutlich die reale Entsprechung dieser theoretischen Ergebnisse gefunden«, meint Jaumann.

Thorsten Dambeck ist Physiker und Wissenschaftsautor in Berlin.

HALBLEITERPHYSIK

Mikrochip mit eingebautem Quantenlabor

Erstmals ist die quantenmechanische Kopplung eines Halbleiterkristalls mit einem Lichtquant gelungen – Voraussetzung für den ultimativen Rechner: den optoelektronischen Quantencomputer.

Von Stefan Maier

Zu den Besonderheiten der Quantenwelt gehört die Möglichkeit der »Verschränkung« von Teilchen. Dabei werden mehrere Atome oder Photonen derart aneinander gekoppelt, dass sich jede Manipulation an einem von ihnen ohne jeden Zeitverzug auf alle anderen auswirkt. Diese Eigenart – Einstein sprach von spukhafter Fernwirkung – erlaubt unter anderem die Teleportation von Objekten: ihre augenblickliche Versetzung an einen anderen Ort.

Aus quantenmechanisch verschränkten Einheiten lässt sich im Prinzip aber auch ein Supercomputer bauen, der bestimmte Rechenoperationen wie etwa die Faktorisierung großer Zahlen oder das Durchforsten unsortierter Datenbanken um Größenordnungen schneller als herkömmliche Rechner ausführen kann. Selbst die besten Geheimcodes, die es derzeit gibt, wären vor ihm nicht sicher, und numerische Simulationen – etwa des Wetters oder Klimas – würden eine ungeahnte Präzision erreichen.

Idealerweise sollte ein solcher Quantencomputer Informationen in miteinander verschränkten Atomen auf einem herkömmlichen Halbleiterchip speichern und verarbeiten. Zur Übermittlung der Daten würden Photonen dienen. Doch bis dieser Superrechner auf unserem Schreibtisch steht, gilt es noch einige Hürden zu überwinden. Ist die Kopplung mehrerer Atome in einem Festkörper schon schwierig genug, so wirft die Weiterleitung von Informationen aus Quantenspeichern ein viel grundlegenderes Problem auf: Quantenzustände lassen sich gewöhnlich nicht exakt kopieren und folglich auch nicht auf einfache Weise auf Photonen übertragen. Das gelingt nur, wenn die Speicheratome selbst mit den Lichtphotonen quantenmechanisch gekoppelt werden.

Zwei Forschergruppen in Pasadena (Kalifornien) und Würzburg haben genau dies jetzt erstmals auf einem Halbleiterchip erreicht *(Nature, Bd. 432, S. 197 und 200)*. Zwar ist es kein einzelnes Atom, sondern ein als Speicherelement fungierender winziger Bereich im Chip, den die Forscher mit einem Photon verkuppeln konnten. Dennoch hat ihr Erfolg den Quantencomputer ein gutes Stück näher gebracht. Außerdem dürfte er weitere Experimente in der Quantenoptik beträchtlich vereinfachen, da For-

schungen auf diesem Gebiet bisher raumgroße Aufbauten erforderten.

Um Atome mit Photonen zu koppeln, muss man sie mit einem Resonator umgeben: einem von Spiegeln eingeschlossenen Raum, in dem Lichtstrahlen viele Male hin- und hersausen und sich dabei verstärken, wenn ihre Frequenz mit der Resonanzfrequenz des Käfigs zusammenfällt. Gut bekannte Beispiele aus Akustik und Optik sind die Resonanzkörper von Instrumenten wie der Geige oder der Laser.

Innerhalb des letzten Jahrzehnts haben es Forscher geschafft, Resonatoren aus Halbleitern herzustellen, die klein genug sind, dass sie sich auf Chips integrieren lassen. Sie finden sich heute schon in allgegenwärtigen Geräten wie CD- und DVD-Spielern und dienen als Verstärker in der Telekommunikation mit Glasfasern.

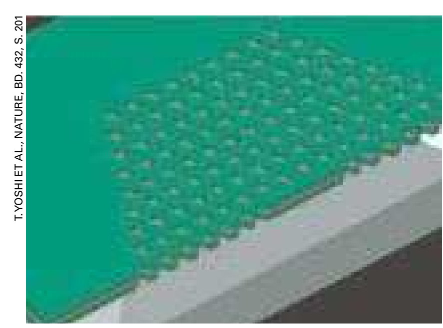
Mangelhafter Käfig für Photonen

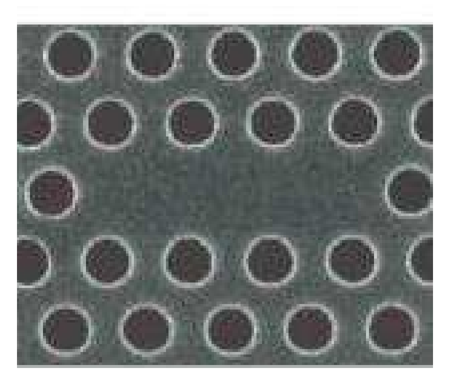
Zudem ist es gelungen, Strukturen in Chips zu erzeugen, die sich genau wie Atome zur Aussendung von Photonen bestimmter Frequenzen anregen lassen. Physiker sprechen von Quantenpunkten. Im Prinzip sollte es also möglich sein, über einen Mikroresonator geeigneter Form und Größe eine quantenmechanische Kopplung zwischen einem Photon und einem solchen Quantenpunkt zu erreichen.

In der Praxis hat sich das jedoch als schwierig herausgestellt. Der Grund ist die unzulängliche Qualität der Mikroresonatoren. Die besten können zwar die Lichtemission darin eingebauter Quantenpunkte verstärken, wenn die Frequenz der Photonen mit einer Resonanz zusammenfällt. Doch ihre »Spiegel« sind nicht gut genug, um ein einzelnes Photon so lange festzuhalten, dass es durch mehrfache Absorption und erneute Emission quantenmechanisch mit dem künstlichen Atom gekoppelt wird.

Eine solche »starke Kopplung« ließ sich bisher nur mit raumgroßen Aufbauten erreichen. Dabei durchqueren Atome, kontrolliert von Magnetfeldern und Laserstrahlen, im Vakuum nacheinander einen Resonator, der Photonen mittels Spiegeln festhält, die mit teuren Reflexionsbeschichtungen überzogen sind. Da die Atome ihn aber schnell wieder verlassen, dauert die Kopplung mit den Photonen nur kurz. Außerdem schließt die komplizierte Apparatur eine technische Anwendung praktisch aus.

Wissenschaftler in aller Welt bemühen sich deshalb schon seit über einem Jahrzehnt, das gleiche Kunststück auch auf einem Chip zu vollbringen. Im Frühjahr 2003 gab es schließlich eine erste Erfolgsmeldung. Allerdings gelang die Kopplung damals nur unter der Zuhilfenahme von Supraleitern, was eine technische Anwendung in herkömmlichen optoelektronischen Geräten beträchtlich erschweren würde. Den endgültigen Erfolg erzielten erst jetzt unabhängig voneinander eine Forschergruppe um Axel Scherer am California Institute of Technology in Pasadena und um Alfred Forchel an der Universität Würzburg. Auf unterschiedlichen Wegen konnten sie aus dem in der Industrie vielfach eingesetzten Halbleiter Galliumarsenid erstmals so perfekte Mikroresonatoren herstellen, dass sich damit ein Photon an einen Quantenpunkt koppeln ließ.

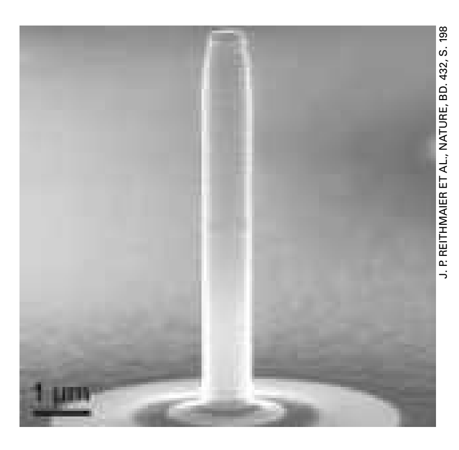




T. YOSHIE ET AL., NATURE, BD. 432, S. 201

Axel Scherer und seine Mitarbeiter am California Institute of Technology in Pasadena ätzten ein regelmäßiges Lochgitter in Galliumarsenid. So erzeugten sie einen photonischen Kristall, der für Licht einer bestimmten Wellenlänge undurchlässig ist. Um daraus einen Resonator zu machen, ließen sie einige Löcher aus. Den Quantenpunkt brachten sie durch Abscheidung von Atomen aus der Gasphase ein.

Die Gruppe um Scherer ätzte mit reaktiven Gasen in Abständen von etwa ▷



J. P. REITHMAIER ET AL., NATURE, BD. 432, S. 198

◀ **Die Arbeitsgruppe von Alfred Forchel an der Universität Würzburg demonstrierte die starke Kopplung zwischen Quantenpunkten und Photonen mit einem Mikroresonator in Form einer winzigen Säule. Darin sind Quantenpunkte auf beiden Seiten von etwa zwanzig abwechselnden Schichten aus Gallium- und Aluminiumarsenid flankiert, die als perfekter Spiegel wirken.**

▷ 300 Nanometern Löcher in das Material. Dadurch erzeugte sie einen so genannten photonischen Kristall, der für Licht in einem bestimmten Frequenzbereich undurchlässig ist. Um daraus einen Resonator zu machen, ließen die Forscher einfach einige Löcher aus. Damit schufen sie einen Käfig, in dem ein darin erzeugtes Photon geeigneter Frequenz gefangen blieb. Die Idee ist nicht neu, doch erst jetzt gelang es, die Geometrie der Löcher exakt genug zu berechnen und auf dem Galliumarsenid hinreichend genau zu realisieren. Den Quantenpunkt brachten die Forscher dann mittels Epitaxie – Abscheidung von Atomen aus der Gasphase – in den Resonator ein.

Forchels Gruppe hingegen konstruierte eine etwa zwei Mikrometer dicke und zehn Mikrometer hohe Säule (Bild oben). Die Quantenpunkte befanden sich in der Mitte und waren wie bei einem Sandwich zwischen zwei Regionen gepackt, in denen sich ungefähr zwanzig dünne Schichten aus Gallium- und Aluminiumarsenid abwechselten. Diese Schichtfolgen wirkten als Spiegel und verwandelten die Säule in einen perfekten Resonator.

Für die Versuche mussten die Forscher ihre Apparaturen noch auf Temperaturen zwischen zehn und dreißig Grad Kelvin abkühlen, um störende thermische Effekte zu vermeiden. Dann regten sie die Quantenpunkte durch einen Laserstrahl an und analysierten mit einem Spektrografen das von ihnen ausgesandte Licht. Dessen Frequenz konnten sie durch Variation der Temperatur auf die Resonanzfrequenz des Mikroresonators abstimmen.

Dass es wirklich zu einer starken Kopplung zwischen jeweils einem Quantenpunkt und einem Photon kam, bewiesen die aufgefangenen Emissionslinien. Bei bloßer Verstärkung des Lichts durch Resonanz wäre nur eine einzige solche Linie aufgetreten. Weil bei starker Kopplung die Energie viele Male zwischen dem Lichtfeld des Resonators und dem Quantenpunkt oszilliert, sind in diesem Fall Emissionen bei zwei verschiedenen Frequenzen beobachtbar.

Beide Forschergruppen konnten das verräterische Linienpaar nachweisen.

Dieser Erfolg wird der Erforschung grundlegender Quantenphänomene und den Bemühungen um einen Quantencomputer einen kräftigen Schub verleihen. Für die Experimente können nämlich immer die gleichen Quantenpunkte verwendet werden, da sie räumlich fest in den Resonatoren eingebettet sind. Zudem lassen sich mehrere Tausend davon auf einem Quadratmillimeter anordnen. Damit haben in Zukunft auch weniger spezialisierte Industrielabors die Chance, eigene Experimente zur Nutzung von Quantenphänomenen für Computer anzustellen – was die Konkurrenz beflügeln und dem Fortschritt der Informationstechnologie Beine machen sollte.

Stefan Maier ist Professor für Physik an der Universität Bath (Großbritannien).

MEDIZIN

Viren missbrauchen Immunzellen als Schutzschild

Bei der Abwehr von Eindringlingen läuft die Körperpolizei Gefahr, versehentlich eigenes Gewebe zu attackieren. Deshalb wird sie streng überwacht. Bestimmte Viren manipulieren diese Kontrolle, sodass sie selbst verschont bleiben.

Von Ulf Dittmer

Chronische Viruserkrankungen sind ein großes medizinisches Problem. Allein mit Hepatitisviren und dem Human-Immunschwäche-Virus (HIV) sind weltweit mehr als 500 Millionen Menschen dauerhaft infiziert: Sie tragen den Erreger lebenslang in sich und verbreiten ihn weiter. Die von solchen persistierenden Viren verursachten Krankheiten wie Aids oder Hepatitis treten meist erst während der chronischen Infektion auf. Die klinischen Symptome kurz nach der Ansteckung sind dagegen harmlos.

Um sich auf Dauer in einem Wirt einnisten zu können, muss ein Virus der Zerstörung durch das Immunsystem entgehen. Die größte Gefahr droht ihm von den so genannten zytotoxischen T-Lymphozyten. Diese »Killer« sind darauf spezialisiert, virusinfizierte Körperzellen zu erkennen und zu zerstören, wobei sie zugleich auch den Erreger beseitigen.

Wie sich Herpesviren dem Zugriff der Immunpolizei entziehen, ist schon seit Langem bekannt: Sie erzeugen Proteine, die verhindern, dass infizierte Zellen Komponenten des Virus auf ihrer Oberfläche präsentieren. Dadurch kann die Körperabwehr diese Zellen nicht als befallen erkennen.

Bei Retroviren, zu denen HIV gehört, vermuteten die Biologen bisher dagegen eine andere Taktik, um durch die Maschen des Immunnetzes zu schlüpfen. Diese Erreger zeichnen sich durch eine hohe genetische Variabilität aus. Deshalb nahm man an, dass sie, sobald das Immunsystem sie als Fremdkörper erkannt und Abwehrmaßnahmen eingeleitet hat – was ein bis zwei Wochen dauert –, ihr äußeres Erscheinungsbild ändern und sich in neuem Gewand präsentieren.

Doch jetzt haben meine Mitarbeiter und ich einen noch raffinierteren Mechanismus entdeckt, wie diese Viren ihr Überleben im Körper sichern.

Demnach büßen auch bei Infektionen mit Retroviren die zytotoxischen T-Lymphozyten ihre Schlagkraft ein; aber im Unterschied zu den Herpesviren ist der Grund diesmal nicht, dass sie infizierte Zellen nicht erkennen. Stattdessen spielen die Erreger, bildlich gesprochen, verschiedene Abteilungen der Immunpolizei gegeneinander aus. Zum Abwehrsystem des Körpers gehören nämlich auch Komponenten, die gleichsam als Oberaufseher die Aktivität der anderen T-Zellen kontrollieren. Hinweise auf ihre Existenz gab es schon Anfang der 1980er Jahre. Damals wurden sie unter dem Namen Suppressor-T-Zellen beschrieben. Aber da es nicht gelang, sie experimentell eindeutig nachzuweisen, gerieten sie wieder in Vergessenheit.

Shimon Sakagushi von der Universität Kioto hat sie dann 1995 wiederentdeckt und regulatorische T-Lymphozyten (T_{reg}) genannt. Ihre Hauptaufgabe ist es, Säugetiere vor einem Angriff des Immunsystems auf gesundes körpereigenes Gewebe zu schützen und so Autoimmunerkrankungen zu verhindern. Zu diesem Zweck überwachen die T_{reg} vor allem die Funktion der zytotoxischen T-Lymphozyten. Diese sind ja auf die Zerstörung von – virusinfizierten oder entarteten – Körperzellen spezialisiert und können somit sehr gefährlich werden, wenn sie außer Kontrolle geraten. Tatsächlich entwickelten Mäuse ohne T_{reg}-Zellen, die Sakagushi und Kollegen experimentell erzeugten, eine Vielzahl von Autoimmunerkrankungen.

Während einer akuten Virusinfektion müssen sich die zytotoxischen T-Lymphozyten besonders stark vermehren und aktiviert werden, um die Eindringlinge in Schach zu halten. Das aber erhöht das Risiko, dass sie im Übereifer auch normale körpereigene Zellen attackieren. Um diese Gefahr zu bannen, zügeln die T_{reg} die Killer. Das erreichen sie auf zweierlei Weise: Zum einen scheiden sie einen Botenstoff namens Interleukin-10 aus, der die Immunreaktion generell dämpft. Zum anderen werfen sie sich selbst ins Getümmel und nehmen zytotoxische T-Lymphozyten an die Kandarre. Dazu tragen sie Oberflächenmoleküle wie CTLA-4, mit dem sie an die Killer andocken und sie zur Räson bringen können.

Nach neuesten Forschungsergebnissen meiner Gruppe, die wir in Kooperation mit dem Team von Kim J. Hasenkrug in den Rocky Mountain Laboratories des National Institute of Allergy and Infectious Deseases in Hamilton (Montana) erhielten, schaffen es persistierende Retroviren offenbar, die fein austarierte Balance zwischen der Aktivität der Killer und ihrer Zügelung durch die regulatorischen T-Lymphozyten zu kippen. Die Kontrolleure verhindern dann nicht nur ein Überschießen der Immunreaktion, sondern unterdrücken sie völlig. Dadurch können befallene Zellen nicht mehr abgetötet werden und die Infektion wird chronisch.

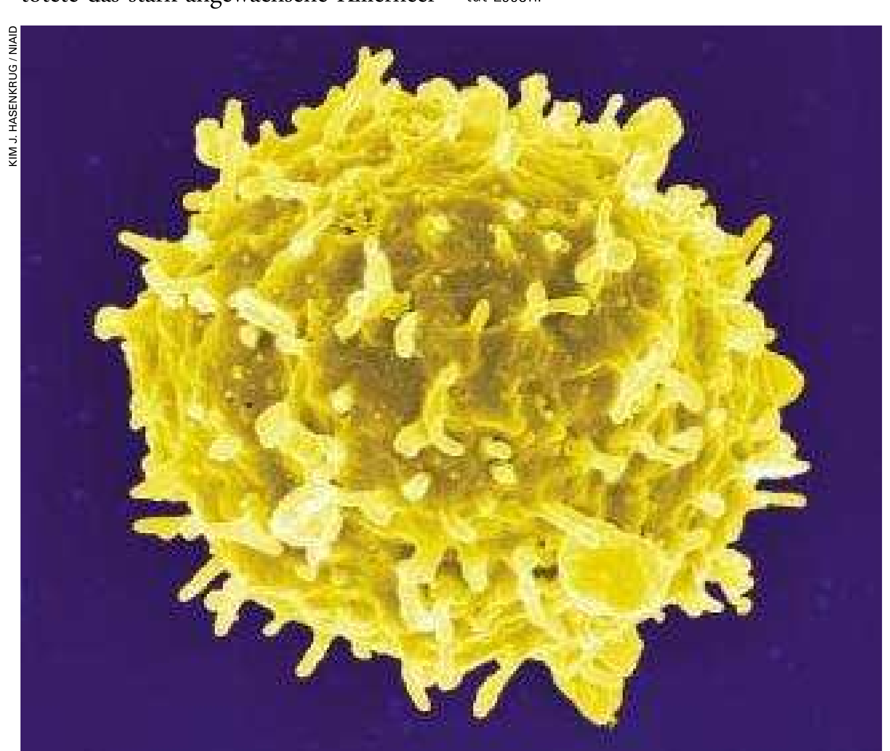
Abwehr formiert sich, aber hält still

Wie persistierende Retroviren dieses Kunststück im Einzelnen vollbringen, haben wir noch nicht herausbekommen. Allerdings ergaben unsere Experimente an Mäusen, dass die zytotoxischen T-Lymphozyten noch sehr wohl fähig sind, virusbefallene Zellen zu erkennen. Bei den Versuchen übertrugen wir chronisch infizierten Nagern Killerzellen, die auf den Erreger spezialisiert waren. Wie wir feststellten, vermehrten sich die Virusjäger in dem befallenen Tier, als würden sie zu einem massiven Schlag ausholen. Doch dann geschah nichts weiter: Weder tötete das stark angewachsene Killerheer infizierte Zellen ab noch produzierte es antivirale Substanzen (so genannte Interferone), mit denen es normalerweise Helfer rekrutiert. Das lässt sich nur damit erklären, dass die regulatorischen T-Lymphozyten, auf irgendeine Weise von den Viren angestachelt, den Killern quasi in den Arm fallen.

Das Faszinierende an diesen Befunden ist, dass sie viel versprechende neue Ansätze für die Therapie chronischer Virusinfektionen bieten. Bei Mäusen gelingt es bereits, die Funktion von regulatorischen T-Lymphozyten durch einen Antikörper zu blockieren. Dieser heftet sich an einen bestimmten Rezeptor auf den T_{reg}-Zellen und setzt sie so für einige Tage außer Gefecht. Dadurch können die zytotoxischen T-Lymphozyten wieder aktiv werden. Als Folge davon geht die Anzahl an virusinfizierten Zellen im Tier drastisch zurück.

Da die T_{reg}-Zellen nur vorübergehend blockiert werden, birgt diese Therapie kaum die Gefahr, Autoimmunerkrankungen auszulösen. Derzeit arbeiten wir daran, sie so weit zu verbessern, dass die persistierenden Viren völlig verschwinden. Zu diesem Zweck kombinieren wir die Antikörper-Blockade der T_{reg} mit einer Impfung, welche virusspezifische Killerzellen gezielt aktiviert. Bei einem Erfolg bestünde erstmals Hoffnung, chronisch verlaufende Infektionskrankheiten wirksam behandeln zu können – ein lang gehegter Wunschtraum der Medizin ginge endlich in Erfüllung.

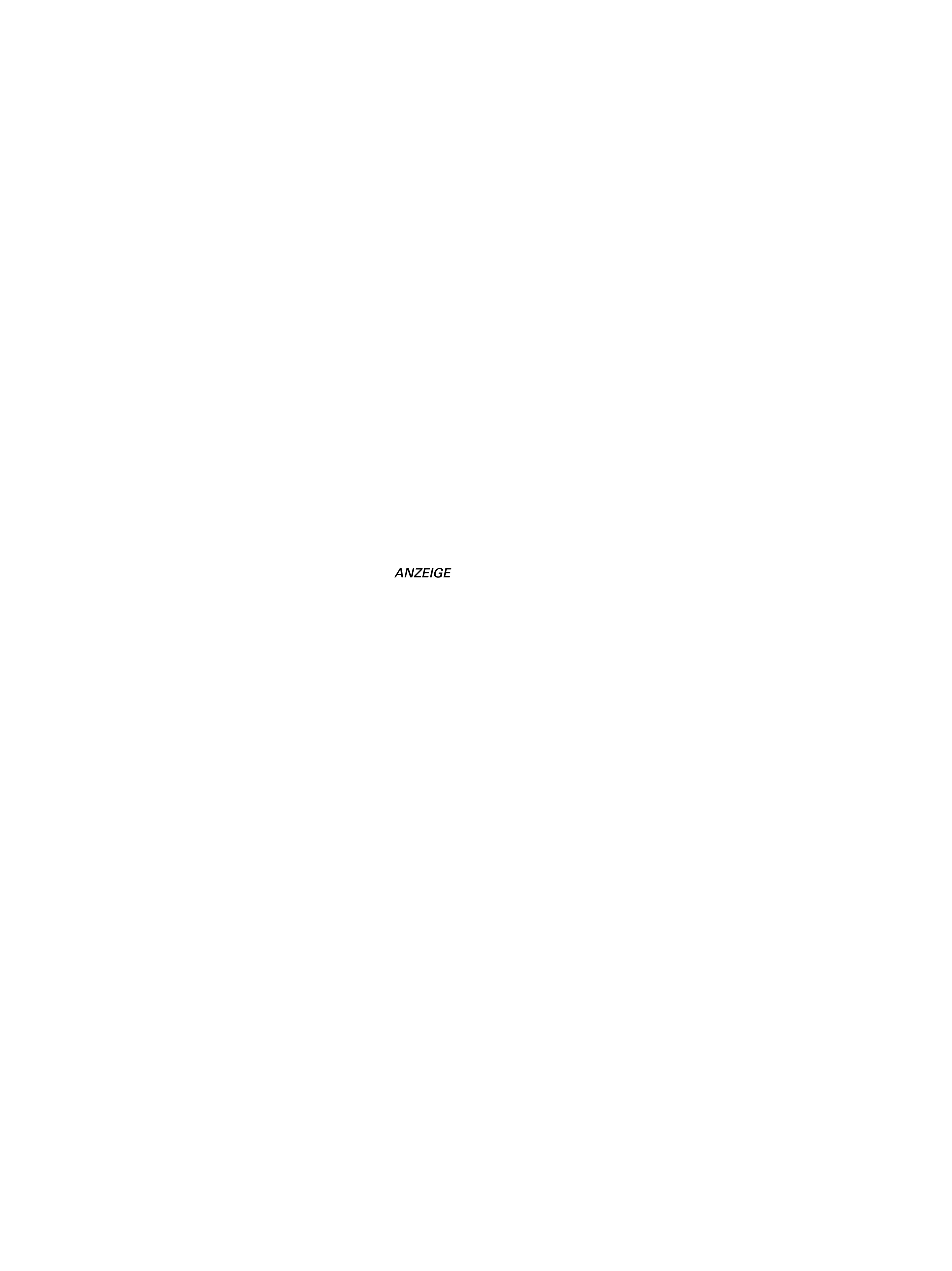
Ulf Dittmer ist Professor für Virologie an der Universität Essen.



KIM J. HASENKRUG / NIAID

Wird von Viren zum Überlisten des Immunsystems eingespannt: eine regulatorische T-Zelle (koloriert).


ANZEIGE


ANZEIGE

KOMMENTAR

Pyrrhus lässt grüßen

Ein Umbruch im wissenschaftlichen Publikationswesen steht vor der Tür: Bei Non-Profit-Zeitschriften zahlt nicht mehr der Käufer, sondern der Autor für die Veröffentlichung.

»Das ist der Teufel!«, polterte vor nicht allzu langer Zeit Harold Varmus, Mitbegründer der Public Library of Science (PLoS), als in einem Interview der Name von Derk Haank fiel. Der war damals Chef der Wissenschaftssparte Elsevier innerhalb der britisch-niederländischen Fachverlagsgruppe Reed Elsevier, die mit rund 1700 Magazinen Marktführer im Fachzeitschriftengeschäft ist. Der verbale Ausfall des Medizin-Nobelpreisträgers ist nur ein Indikator dafür, wie heftig der Konflikt in diesem Bereich inzwischen tobt – PLoS und Elsevier sind dabei bloß Stellvertreter zweier Gruppierungen, die sich unversöhnlich gegenüberstehen.

Die Fachverlage, angeführt von einigen Großen wie Elsevier, Thomson oder Springer Science+Business Media, wollen am klassischen »Leser-zahlt«-Modell wissenschaftlicher Informationsverbreitung festhalten. Auf der anderen Seite stehen Non-Profit-Initiativen mit ihrem Gegenentwurf des Open-Access-Modells, allen voran PLoS, DOAJ oder Biomed Central. Sie gewähren freien Zugang zu ihren im Internet publizierten Journalen – inzwischen sind es einige tausend. Zahlen müssen in diesem Modell die Wissenschaftler, die ihre Arbeiten veröffentlichen wollen.

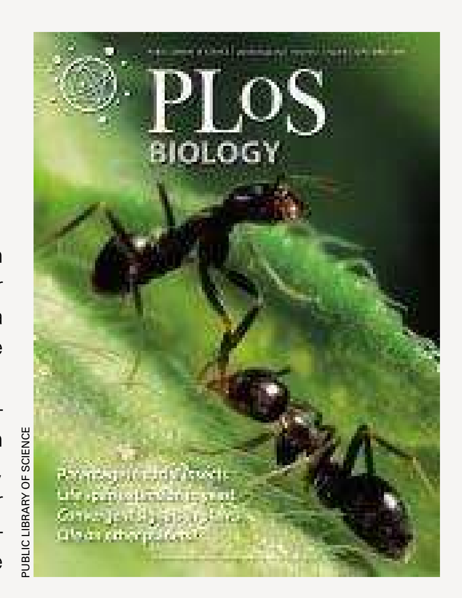
Die Idee des Open Access ist an sich nichts Neues, stellte doch schon Anfang der 1990er Jahre der amerikanische Physiker Paul Ginsparg mit dem Internetserver Arxiv.org eine Plattform für frei zugängliche Vorabveröffentlichungen bereit. Der jetzt einsetzende Boom von Open-Access-Journalen hat seine Ursache in der so genannten »Krise der wissenschaftlichen Informationsversorgung« – der seit Jahren wachsenden Kluft zwischen Bibliotheken-Budgets und den Preisen wissenschaftlicher Zeitschriften. Diese sind dem »Library Journal« zufolge innerhalb der letzten 15 Jahre um durchschnittlich 215 Prozent gestiegen. Einzelne Journale kosten die Büchereien inzwischen mehrere tausend Euro im Jahr. Das Geld fließt in die Kassen der hoch profitablen Verlage: So wies etwa Elsevier im Geschäftsbericht 2003 eine Umsatzrendite von 33,8 Prozent aus.

Problematisch ist dabei, dass die wissenschaftlichen Arbeiten, die in den Fachmagazinen veröffentlicht werden, meist im Rahmen staatlich geförderter Forschungsprojekte entstanden sind. Zugespitzt ausgedrückt: Die Fachverlage profitieren von Forschungsergebnissen, für die sie selbst keinen Cent bezahlt haben, und verkaufen sie anschließend für viel Geld wieder an die Universitäten und Forschungseinrichtungen zurück – zu Lasten des Steuerzahlers. Die Bibliotheken reagieren angesichts dieser Situation mit dem Rotstift und bestellen reihenweise Zeitschriften ab – die Leid Tragenden sind Studenten und Wissenschaftler.

Die hohen Kosten, die auch beim Online-Bezug der Journale anfallen, rechtfertigen die Verleger mit dem Aufwand für das Layout und dem so genannten Peer-Review-Verfahren. Hier wacht ein Gremium von Wissenschaftlern, das Editorial Board, darüber, dass nur solche Artikel Eingang in das Magazin finden, die hohen wissenschaftlichen Ansprüchen genügen.

Die Argumente wirken jedoch vorgeschoben: Meist sind die Board-Mitglieder Wissenschaftler, die ihre Funktion ehrenamtlich ausüben. Und die hohen Anforderungen, die von den klassischen Journalen hinsichtlich Artikel und Grafiken an die Autoren gestellt werden, lassen den großen Layout-Aufwand der Verlage zumindest fraglich erscheinen.

Es sei ungerecht, den Autor zur Kasse zu bitten, die Kosten also vom Konsumenten auf den Produzenten zu verlagern, lautet ein weiteres Standardargument gegen Open Access. In der Regel trägt aber nicht der Wissenschaftler selbst diese Kosten, sondern die Institution, für die er forscht. Diese spart im Gegenzug die Abonnements der herkömmlichen Zeitschriften ein. Das klingt nach rechter Tasche, linker Tasche. Doch nach einer Studie der Bank BNP Paribas soll es die Universitäten unterm Strich tatsächlich billiger kommen. Funktionieren wird es allerdings nur, wenn sich Open Access schnell durchsetzt und viele Journale auf das neue Geschäftsmodell umstellen. Sonst zahlen die Bibliotheken doppelt – und damit drauf.



PUBLIC LIBRARY OF SCIENCE

Die Public Library of Science bietet bisher zwei Journale – »PLoS Biology« und »PLoS Medicine« – unentgeltlich im Internet an. Die gedruckte Ausgabe kostet 160 Dollar im Jahresabonnement.

Auch in den traditionellen Fachzeitschriften können die Autoren im Übrigen keineswegs immer kostenfrei publizieren. Für »Extras« wie Fotos oder Grafiken werden oft hohe Zuzahlungen fällig. Zum Beispiel verlangt das renommierte Fachblatt »Cell« 1000 US-Dollar für die erste Abbildung und 250 Dollar für jede weitere – bei PLoS dagegen sind es einmalig 1500 Dollar pro Artikel.

Wie steht es mit der Qualitätssicherung in Open-Access-Journalen? Dem »Autor-zahlt«-Modell von vornherein Gefälligkeitsveröffentlichungen zu unterstellen, wäre unfair. Dennoch besteht diese Gefahr, wenn diejenigen, die Artikel in einer Zeitschrift veröffentlichen

wollen, gleichzeitig die Geldgeber sind. Dagegen spricht jedoch, dass sich Open-Access-Magazine ebenfalls unabhängiger Experten für das Peer Review bedienen. Außerdem streben auch sie nach einem möglichst hohen Renommee, das sich danach bemisst, wie oft und wo ein Journal zitiert wird – und das erreicht man nicht durch minderwertige Beiträge. Vor denen sind übrigens auch klassische Fachzeitschriften nicht gefeit – so muss immer wieder einmal ein zweifelhafter Artikel zurückgezogen werden. Dagegen bewies »PLoS Biology« schon in seiner ersten Ausgabe, dass sich auch in einem Open-Access-Magazin Hochkarätiges findet: Der Artikel einer Forschergruppe um Miguel Nicolelis über ein Gehirn-Maschine-Interface wurde am ersten Tag so oft abgerufen, dass die Server in die Knie gingen.

Bleibt abzuwarten, wann die Verlagsriesen auf den Open-Access-Boom von PLoS & Co. reagieren werden. Zwar stellten sich die Chefs von Reed-Elsevier, Morris Tabaksblat und Chrispin Davis, im Geschäftsbericht 2003 noch demonstrativ hinter das klassische Geschäftsmodell. Sie kündigten aber auch an, das »Autor-zahlt«-Modell zu beobachten und zu investieren, »wo Neuerungen nachweisbaren und nachhaltigen Erfolg« für die Wissenschaft brächten. Übernehmen die Großverlage tatsächlich das Open-Access-Geschäftsmodell, hätte Varmus sein Ziel erreicht.

Doch Zweifel bleiben. Im Unterschied zu Non-Profit-Organisationen wie PLoS wollen die Großverlage Gewinn machen und haben zudem in den letzten Jahren Millionen in Onlineplattformen und in die Digitalisierung ihrer riesigen Archive investiert. Diese Summen gilt es wieder hereinzuholen – notfalls durch überhöhte Abdruckgebühren für die Autoren. Das wäre dann ein Pyrrhussieg, und Varmus hätte abermals Grund, verbal den Teufel zu bemühen.

Oliver Koch

Der Autor ist freier Wissenschaftsjournalist in Mainz.

MATERIALFORSCHUNG

Auf Biegen und Brechen

Karlsruher Forscher haben eine einfache lithografische Methode entwickelt, mit der sich hochpräzise Linsensysteme für Röntgenlicht praktisch am Fließband herstellen lassen.

Von Frank Schubert

Optische Linsen gibt es schon seit Jahrhunderten. In Form von Brillen verhelfen sie uns zu besserem Sehvermögen, in Fernrohren liefern sie Abbilder des Sternenhimmels, und in Kameras sorgen sie dafür, dass wir scharfe Urlaubsfotos knipsen können. Meist aus Glas gefertigt, brechen sie die Lichtstrahlen und richten sie so auf einen Punkt, den Brennpunkt.

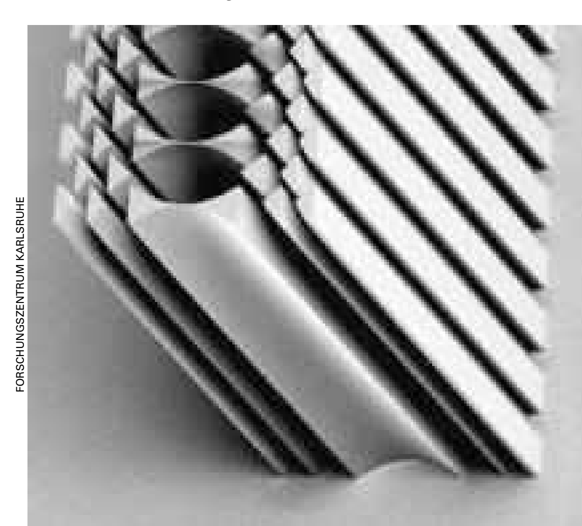
Röntgenlicht ist mit Linsen dagegen viel schwerer zu bündeln. Wegen seiner wesentlich kleineren Wellenlänge wird es beim Übergang von einem Medium zum anderen nämlich kaum gebrochen. Außerdem dringt es durch die meisten Materialien nicht so ungestört wie Licht durch Glas. Deshalb nutzte man zunächst statt der Brechung die Beugung oder Reflexion, um Röntgenstrahlen zu fokussieren. Dabei wurden sie durch Anordnungen aus schmalen, ringförmigen Spalten – so genannte Fresnel'sche Zonenplatten – geschickt oder an Spiegeln bei streifendem Einfall abgelenkt. Die Qualität dieser Bündelung reicht jedoch nicht an die von Glaslinsen heran; außerdem sind die Apparaturen schwierig herzustellen beziehungsweise sehr sperrig.

Erst vor rund zehn Jahren gelang es schließlich, Röntgenstrahlen auch effizient zu brechen und auf diese Weise zu fokussieren. Der Trick: Man reihte viele Linsen aneinander. Dabei mussten die Physiker freilich Materialien verwenden, die für das kurzwellige Licht hoch transparent sind – sonst wären die Absorptionsverluste zu groß geworden. Ein Stoff verschluckt umso weniger Röntgenstrahlung, je kleiner seine Atome sind, das heißt je niedriger seine chemische Ordnungszahl ist. Daher bestanden die ersten Röntgenlinsen aus Leichtmetallen wie Beryllium oder Aluminium. Aber auch Verbindungen aus mehreren Elementen mit kleiner durchschnittlicher Ordnungszahl – wie Kunststoffe – eignen sich, sofern sie gegen die Strahlung beständig sind.

Linsen per Lithografie

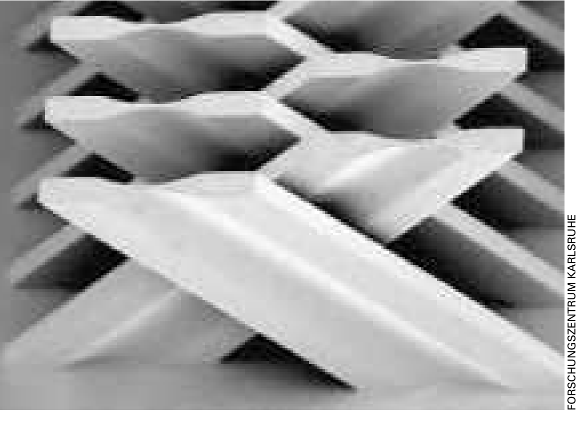
Eine Schwierigkeit bestand jedoch darin, die vielen einzelnen Linsen exakt genug hintereinander anzuordnen, um keine optischen Verzerrungen zu erhalten. Eine Gruppe am Institut für Mikrostrukturtechnik des Forschungszentrums Karlsruhe unter Leitung von Volker Saile konnte dieses Problem nun elegant lösen. Sie entwickelte eine Methode, mit der sich säulenartige Anordnungen von Röntgenlinsen aus Kunststoff relativ unkompliziert in einem einzigen Arbeitsgang äußerst präzise herstellen lassen.

Dazu bedienen sich die Karlsruher Forscher eines lithografischen Verfahrens und eines speziellen Polymers namens SU-8. Zunächst erzeugen sie eine Negativschablone der späteren Säulenstruktur aus Metall und legen diese auf den Kunststoff. Dann richten sie einen extrem starken Röntgenstrahl darauf, der ▷



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Mit diesen gut einen Millimeter hohen Kunststoffstrukturen können Röntgenstrahlen in einer Richtung – also auf eine Linie – fokussiert werden. Da für Röntgenlicht der Brechungsindex von Luft größer ist als der von Kunststoff, müssen Sammellinsen in diesem Fall konkav statt konvex sein. Die dreieckigen Säulen am Rand erhöhen die Apertur.



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Zweifache Belichtung des Kunststoffs aus unterschiedlichen Winkeln liefert ein Linsensystem, das die einfallende Strahlung in zwei Richtungen fokussiert und sie somit auf einen Punkt statt nur auf eine Linie bündelt.



FORSCHUNGSZENTRUM KARLSRUHE

Verschiedenartige Linsensysteme, die nebeneinander auf einer Platte angeordnet sind, bilden eine Art Wechselobjektiv für Röntgenstrahlen. Ihre Brennweite variiert mit der Anzahl und Form der aneinander gereihten Einzellinsen.

▷ aus einer Synchrotron-Strahlungsquelle, also einem Teilchenbeschleuniger, stammt. Er dringt durch die Öffnungen der Schablone und löst in dem Polymer dahinter chemische Reaktionen aus, durch die sich die Moleküle untereinander vernetzen.

Nach dem Entfernen der Schablone legen die Forscher den Kunststoff in eine Mischung aus Ether, Glykol und Wasser. Darin lösen sich an den abgedeckten Stellen, zu denen keine Röntgenstrahlen vorgedrungen sind, die unveränderten, also nicht vernetzten Polymer-Moleküle. Übrig bleibt nur die in der Negativschablone vorgegebene Säulenstruktur.

»Unsere Herstellungsmethode hat mehrere wichtige Vorteile«, sagt Jürgen Mohr aus dem Karlsruher Team, »zum einen ist der Kunststoff SU-8 in seiner vernetzten Form sehr beständig gegenüber Röntgenlicht – unsere Linsen haben also einen geringen Verschleiß. Zum anderen erreichen wir eine große Genauigkeit bei der Herstellung und damit eine hohe optische Qualität.« Bisherige Röntgenlinsen bestehen zum Beispiel aus hintereinander angeordneten Folien aus Beryllium, in die mit Kugeln Vertiefungen gepresst wurden. Diese Folien müssen jeweils akribisch justiert werden, was bei dem neuen Verfahren nur einmal bei der Schablone nötig ist: Mit der Vorlage lassen sich dann beliebig viele Röntgenlinsen gleichsam am Fließband fertigen

Einen weiteren Vorzug sieht Mohr darin, dass man mit der Lithografie sehr dicht gepackte Säulenstrukturen herstellen kann: Der Abstand der einzelnen Linsenelemente beträgt nur zwei Mikrometer. Dadurch verkürzt sich der Weg, den das Röntgenlicht durch den Kunststoff zurücklegen muss, und es geht weniger davon durch Absorption verloren.

Linsen per Lithografie

Am Karlsruher Forschungszentrum ist man derzeit noch dabei, die neuen Linsen zu testen und abzuschätzen, wo sie sich überall einsetzen lassen. Dabei arbeitet das Team um Saile eng mit anderen Forschergruppen zusammen. »Interesse an unseren Linsen besteht auf der ganzen Welt«, berichtet Mohr.

Eine Anwendungsmöglichkeit wäre ein Röntgenmikroskop, das noch Details von einigen Nanometern auflöst. Biologen könnten damit winzige Strukturen in Zellen sichtbar machen. Das gelingt zwar im Prinzip auch heute schon mit Elektronenmikroskopen, aber die Strahlenbelastung ist dabei viel größer, sodass die Präparate oft zerstört werden.

Auch Astronomen dürften sich über die Karlsruher Neuentwicklung freuen. Es gibt bereits Satellitenteleskope im All, die das Universum im Röntgenbereich ablichten. Solche Instrumente könnten mit den neuen hochpräzisen Linsen noch schärfere Aufnahmen liefern.

Anwendungen eröffnen sich schließlich auch in der Forensik sowie bei der Untersuchung alter Dokumente oder Gemälde. Da die Karlsruher Linsen eine Fokussierung auf einen Punkt von nur 400 Nanometer Durchmesser erlauben, lassen sich selbst winzige Pigmentreste oder andere Spuren gezielt einzeln analysieren. Das kann helfen, beispielsweise Fälschungen zu entlarven oder über die Art der Tinte die Urheberschaft oder das Entstehungsdatum eines Schriftstücks zu klären. So können auch die Geisteswissenschaften von den neuen Röntgenlinsen profitieren.

ERINNERN SIE SICH DARAN, DASS ICH IHNEN EINE GROSSE ZUKUNFT IN UNSEREM INSTITUT PROPHEZEITE? – NUN, ICH HABE MICH GEIRRT!

OH

Frank Schubert ist promovierter Biophysiker und Wissenschaftsjournalist in Heidelberg.

Springers
EINWÜRFE

von Michael Springer

Laufende Menschwerdung

Erst rasche Fortbewegung zu Fuß brachte den Affen evolutionär voran.

Wann ist der Mensch ein Mensch? Wenn der nackte Affe den aufrechten Gang praktiziert? Den Daumen abspreizt? Wenn er Werkzeuge herstellt und anwendet? Wenn er, statt vor sich hin zu grunzen, mit seinen Artgenossen artikuliert spricht?

Wir suchen und finden gern Gründe, uns von unseren nächsten Verwandten abzugrenzen. Gerade deren stammesgeschichtliche Nähe macht sie uns irgendwie peinlich. Man beobachte nur einmal, wie der Gesichtsausdruck von Menschen, die im Zoo dem Treiben der Primaten zusehen, zwischen Spott und Verlegenheit changiert. Mich laust der Affe, sagen wir, wenn wir ungläubig staunen, und ungern lassen wir uns zum Affen machen.

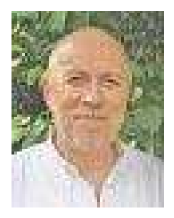
Genau das ist dem armen Tarzan passiert, der als Kind unter die Affen fiel. Seitdem schwingt er sich im Schurz von Liane zu Liane und jodelt. So einen Menschen kann man nicht ernst nehmen.

Zum Baumhangeln sind wir eben nicht geschaffen, wir sind bodenständige Wesen. Gehen und laufen, das liegt uns, dafür sind wir gebaut. Im Gehen, nicht im Sitzen kämen ihm neue Gedanken, fand der Philosoph Friedrich Nietzsche. Und der Schriftsteller Günter Herburger legt soeben den dritten Teil seiner Extremlauftrilogie vor. »Schlaf und Strecke« demonstriert – nach den Vorläufern »Lauf und Wahn« und »Traum und Bahn« –, wie anders der Mensch Länder und Berge, Wüsten und Städte erlebt und wie die Fantasie aufs Schönste Amok läuft, wenn beim Hundert-Kilometer-Marathon Endorphine das Läuferhirn überschwemmen.

War es am Ende das? Hat uns Affen erst die Fähigkeit zum Dauerlauf zu echten »modernen« Menschen gemacht? Für diese zunächst verblüffende Behauptung haben der Biologe Dennis Bramble von der University of Utah und der Anthropologe Dan Lieberman von der Harvard-Universität in Cambridge (Massachusetts) jüngst eine Reihe überzeugender Indizien vorgelegt *(»Nature«, Bd. 432, S. 345)*.

Als Läufer kann der kurz- und krummbeinige Affe mit seinen fast am Boden schleifenden Armen dem stramm auf einem Marathon-Siegerpodest stehenden *Homo* nicht das Wasser reichen. Federnde Achillessehnen, muskulöse Kopfstabilisatoren, pralle Gesäßmuskeln zeichnen uns als begabte Dauerläufer aus. Dagegen beschämen die äffischen Verwandten zwar in Urwaldwipfeln jeden Trapezkünstler in der Zirkuskuppel, machen aber beim Sprint durchs Steppengras gar keine gute Figur. Denn da galt es zu Zeiten der Menschwerdung, mit Hyänen um Nahrung zu konkurrieren oder gegen gefräßige Verfolger Boden gutzumachen.

Zwanglos erklären die beiden US-Forscher auch, warum wir schwitzen und Affen nicht, und warum wir nicht am ganzen Körper behaart sind wie sie: Dauerläufer müssen eben überschüssige Körperwärme rascher loswerden.



Menschen wurden demnach gute Läufer, weil sie einst, bevor die ersten Jagdwaffen aufkamen, mit hundeartigen Vierbeinern um die Wette rannten – und vielleicht halten wir uns deshalb heute zahme Wölfe. Wenn wir über Stock und Stein laufen, durch Stadt und über Land, kommen frische Gedanken, entstehen sogar komplette Trilogien. Erst laufend kommt der Mensch zu sich.

Klare Sicht durch Augenlinsen

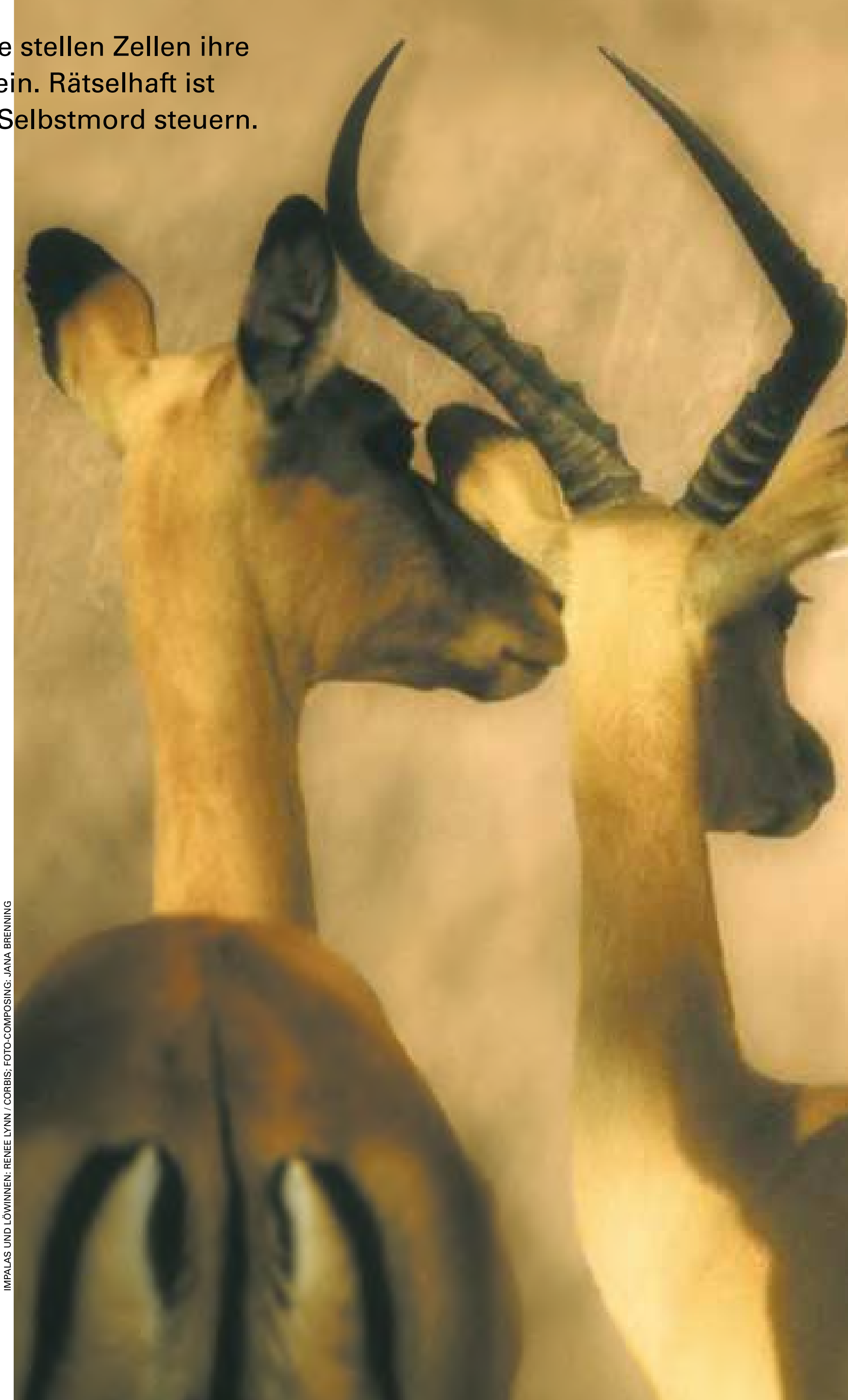
Für eine glasklare Augenlinse stellen Zellen ihre Lebensfunktionen fast ganz ein. Rätselhaft ist noch, wie sie ihren Beinahe-Selbstmord steuern.

Von Ralf Dahm

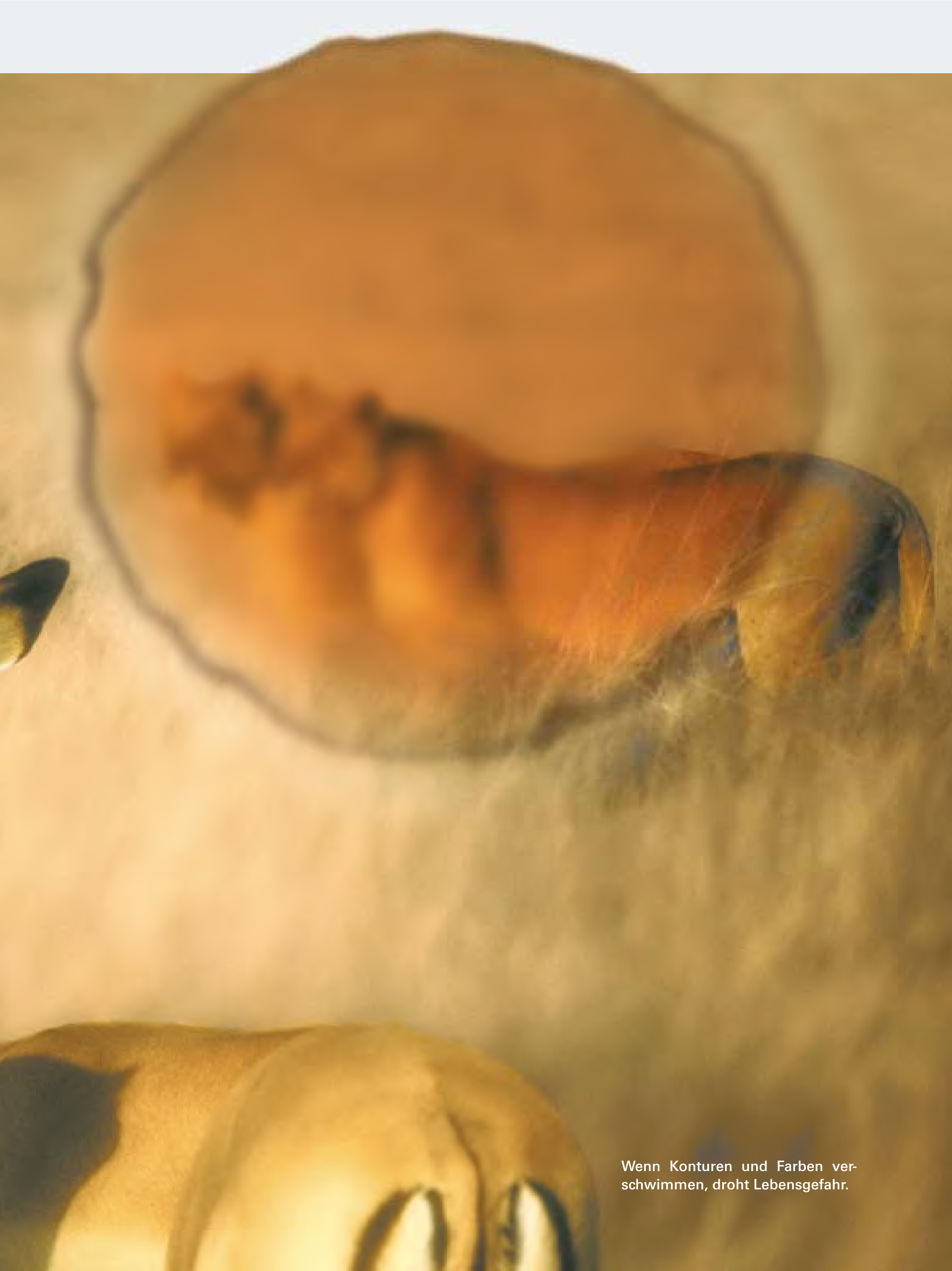
Wenn die Augen im Alter trüb werden, verhilft oft eine künstliche Linse wieder zu klarem Sehen – heute eine Routineoperation. Das Ersatzobjekt besteht aus Kunststoff. Die natürliche Augenlinse aber bildet sich aus lebenden Zellen. Damit sie Abbilder der Außenwelt scharf auf die Netzhaut wirft, muss sie so transparent sein wie Glas, dabei aber wegen der Fokussierung zugleich nachgiebig. Und wäre die Linse getönt, würden wir viele Farbnuancen unserer Umwelt nicht sehen.

Augenlinsen gehören zu den Wundern der Natur. Normalerweise sind lebende Gewebe nicht durchsichtig, für Licht allenfalls in dünner Schicht durchscheinend. Worauf die Transparenz der Linse beruht, wissen die Forscher schon länger. Wie die Zellen das aber erreichen, verstehen sie bisher nur ansatzweise. Erst vor wenigen Jahren haben sie überhaupt erkannt, dass die Linsenzellen dazu einen Beinahe-Selbstmord ausführen, bei dem sie alle ihre Organellen – sozusagen ihre verschiedenen inneren Fabriken – einschließlich des Zellkerns beseitigen.

Die reife Linse könnte man als eine Art biologischen, lebenden Kristall bezeichnen. Optisch verhält sie sich so homogen, dass sie eintretende Lichtstrahlen so gut wie nirgends ablenkt oder absorbiert. Zum einen liegen ihre Zellen hochpräzise geordnet, weswegen sich an ihren Grenzen Lichtstrahlen nur minimal brechen. Dabei richten sich die Zellaußenmembranen weit gehend parallel zueinander aus – und zwar senkrecht zu den einfallenden Lichtstrahlen. Hin- ▷



IMPALAS UND LÖWINNEN: RENEE LYNN / CORBIS; FOTO-COMPOSING: JANA BRENNING



Wenn Konturen und Farben verschwimmen, droht Lebensgefahr.

zu kommt, dass diese Membranen fast den gleichen Brechungsindex aufweisen wie das Zytoplasma, die Masse im Zellinneren. Und schließlich enthalten die Zellen auch keine Moleküle und Organellen mehr, die Licht absorbieren oder brechen könnten.

Völlig durchsichtige biologische Gewebe gibt es sonst kaum. Als Einziges ist die vor der Linse liegende Hornhaut gleichfalls transparent. Doch diese besteht größtenteils nicht aus Zellen, sondern aus einer Gallertmasse aus Proteinen und Zuckermolekülen.

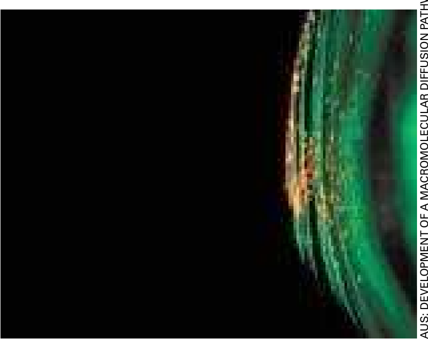
Transparenz als Ausnahme

Dass Zellen gewöhnlich nicht glaskar sein können, sondern bestenfalls zu einem Teil lichtdurchlässig, zeigen die vielen Geschöpfe in der Tierwelt, durch die Licht durchscheinen kann oder die durchscheinende Strukturen aufweisen. Manche fast durchsichtigen Meeres- und Süßwasserbewohner tarnen sich so hervorragend vor Feinden, für die sie gegen den Hintergrund optisch verschmelzen. Aber selbst Quallen, die fast nur aus Wasser bestehen, fangen einen Teil des Lichts ein. Und die Flügel einiger Insekten erinnern zwar an hauchfeines Glas, doch bereits mehrere davon übereinander sehen milchig aus.

Totale Transparenz tritt bei Lebewesen schon deswegen so selten auf, weil sich Zellen normalerweise nicht so streng wie in der Augenlinse ausrichten. Auch können sie für ihren Stoffwechsel auf die Organellen samt Zellkern mit ihren diversen Membranen nicht verzichten. Da solche Zellbestandteile eine andere optische Dichte aufweisen als das reine Zytoplasma, bricht sich an jedem Übergang das Licht.

Zudem erscheinen manche Zelltypen farbig, weil sie Moleküle enthalten, die bestimmte Wellenlängen des Lichts absorbieren. So rührt beispielsweise die Farbe der roten Blutkörperchen vom Hämoglobin her. Da Blut fast alle unsere





AUS: DEVELOPMENT OF A MACROMOLECULAR DIFFUSION PATHWAY IN THE LENS, VON V. I. SHESTOPALOV UND S. BASSNETT, IN: JOURNAL OF CELL SCIENCE, BD. 15, 2003

Die beiden Fotos zeigen Querschnitte durch Augenlinsen von Mäusen. Sie lassen ahnen, dass die Zellkerne (rot) der inneren Faserzellen abgebaut werden. Die oben gezeigte Linse ist noch sehr jung. Selbst ihre inneren Faserzellen enthalten offenbar noch Kerne. Die untere Linse ist reifer. Zellkerne sind nur noch in den äußeren Schichten vorhanden.

Gewebe versorgt, sehen unsere Organe mehr oder weniger rötlich aus. Wäre aber die Augenlinse nur leicht getönt, würde die Wahrnehmung von Farbschattierungen verfälscht.

Tatsächlich geschieht das im Alter, weil sich in den Linsenzellen mit den Jahren Proteine anreichern, die wegen Zuckeranlagerungen blaues und grünes Licht absorbieren. Dadurch verfärbt sich die Linse allmählich gelblich bis bräunlich. Alte Menschen sehen die Welt darum mehr in Rot-, Braun- und Gelbtönen als junge. Der Altersstar wiederum, die trüb gewordene Linse, ist ein später Tribut für die Klarsicht. Ohne Zellkern und Organellen können die Linsenzellen nur einen stark eingeschränkten Stoffwechsel betreiben. Zwar versorgt sie ihr Außenmedium: Benötigte Stoffe diffundieren in sie hinein. Doch Defekte vermögen sie in vielen Fällen nicht auszubessern. Und beschädigte Zellen kann die Linse nicht ersetzen. Die Fähigkeit zur Regeneration, einer der größten Vorteile lebender Systeme, hat die Augenlinse nur zu einem geringen Teil.

Andere Organe erneuern ihre Zellen fortlaufend. Hautzellen beispielsweise leben nur eine Woche, rote Blutkörperchen mehrere Monate. Innerhalb eines halben Jahres tauscht der Körper seine Moleküle zu etwa neunzig Prozent aus. Viele davon überdauern höchstens Minuten, andere nur Stunden oder Tage. Bei unserer Augenlinse dagegen sind wir lebenslang auf dieselben Zellen angewiesen und sogar weit gehend auf dieselben Moleküle. Sämtliche Beeinträchtigungen, ob UV- oder Hitzestrahlung, Versorgungsengpässe oder sonstige Schäden, bleiben bestehen und häufen sich über die Jahre an.

Eine menschliche Augenlinse misst im breiten Durchmesser, sozusagen am Äquator, etwa zehn Millimeter, im flachen, zwischen den beiden Polen, bis zu fünf Millimeter. Sie besteht aus schmalen, extrem langen bandförmigen Zellen, den Faserzellen, die fast von einem Pol zum anderen reichen (siehe Kasten rechts). Diese Bänder liegen eng verzahnt dicht bei dicht nebeneinander und in etwa tausend Lagen – zwiebelartig – übereinander.

Zellen mit ungewöhnlichem Alter

Beim Embryo entsteht zuerst der Linsenkern. Dazu schnürt sich von der Haut vorher ein Bläschen mit Stammzellen ab, aus dem später die Linse wird. Von den Stammzellen des Bläschens differenzieren sich zunächst nur die hinten, in Richtung Netzhaut liegenden Zellen. Sie verlängern sich quer durch das Linsenbläschen bis zu dessen Vorderseite. Dieser Kern bleibt zeitlebens im Zentrum der Linse erhalten.

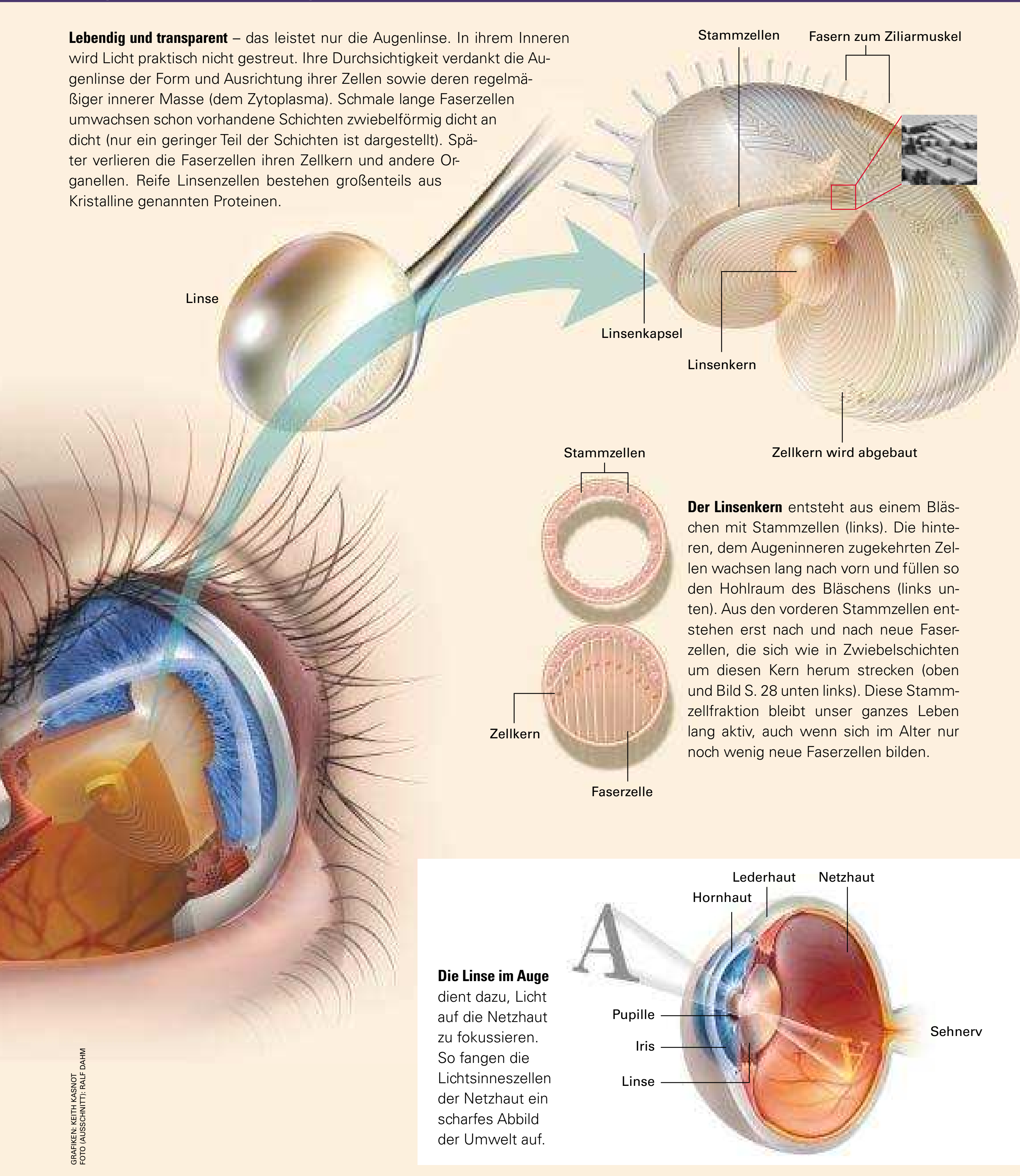
Das weitere Linsenwachstum erfolgt von den vorderen, dem Licht zugekehrten Stammzellen her. Anders als die hintere Fraktion existieren sie noch beim erwachsenen Menschen. Über Jahrzehnte liefern sie neue Faserzellen, die sich je-

IN KÜRZE

- Die Zellen der **Augenlinse** verzichten auf die meisten lebensnotwendigen Strukturen – und bleiben dennoch am Leben. Irgendwie gelingt es ihnen, einen **Selbstmord** (eine Apoptose) einzuleiten, ohne dass sie dabei vollständig zu Grunde gehen.
- Forscher möchten diese Mechanismen verstehen. Sie versprechen sich davon Einsicht über den **grauen Star** wie auch über eine Reihe von Krankheiten, bei denen diese Vorgänge außer Kontrolle geraten.

Augenlinsen – eine glasklare Sache

Lebendig und transparent – das leistet nur die Augenlinse. In ihrem Inneren wird Licht praktisch nicht gestreut. Ihre Durchsichtigkeit verdankt die Augenlinse der Form und Ausrichtung ihrer Zellen sowie deren regelmäßiger innerer Masse (dem Zytoplasma). Schmale lange Faserzellen umwachsen schon vorhandene Schichten zwiebelförmig dicht an dicht (nur ein geringer Teil der Schichten ist dargestellt). Später verlieren die Faserzellen ihren Zellkern und andere Organellen. Reife Linsenzellen bestehen großenteils aus Kristalline genannten Proteinen.



Der Linsenkern entsteht aus einem Bläschen mit Stammzellen (links). Die hinteren, dem Augeninneren zugekehrten Zellen wachsen lang nach vorn und füllen so den Hohlraum des Bläschens (links unten). Aus den vorderen Stammzellen entstehen erst nach und nach neue Faserzellen, die sich wie in Zwiebelschichten um diesen Kern herum strecken (oben und Bild S. 28 unten links). Diese Stammzellfraktion bleibt unser ganzes Leben lang aktiv, auch wenn sich im Alter nur noch wenig neue Faserzellen bilden.

Die Linse im Auge dient dazu, Licht auf die Netzhaut zu fokussieren. So fangen die Lichtsinneszellen der Netzhaut ein scharfes Abbild der Umwelt auf.

GRAFIKEN: KEITH KASNOT
FOTO (AUSSCHNITT): RALF DAHM

▷ weils außen über die schon ausdifferenzierten Linsenzellen legen. Und zwar wachsen neue Bänder immer von der Breite der Linse her – sozusagen von ihrem Äquator, dem Bereich hinter der Iris, wo die Linse ringsum aufgehängt und mit so genannten Ziliarmuskeln verbunden ist. So vergrößert sich die Augenlinse zeitlebens, ohne dass sich die inneren Zonen erneuern.

Dass diese Stammzellen noch bei älteren Menschen aktiv sind, erweist der so genannte Nachstar. Er entsteht nach einer Staroperation aus nicht entfernten Zellen. Diese bilden nun allerdings keine durchsichtige Linse, sondern vermehren und verteilen sich in dem entstandenen Hohlraum unkontrolliert. Weil sie die Sicht trüben, werden sie in einem zweiten Eingriff entfernt.

Frische Faserzellen verlieren während der Entwicklung schon bald ihre Organellen und den Zellkern, also praktisch ihren gesamten Stoffwechselapparat. Doch erhalten bleiben die äußere Zellmembran und auch das Zytoskelett. Dieses gibt der Zelle Stabilität und damit ihre Form. Das Zytoplasma, das wässrige Zellinnere, gewinnt nun eine besonders kompakte Konsistenz. Bei reifen Linsenzellen besteht es hauptsächlich aus in Wasser gelösten Kristallinen. Der Name dieser Proteine lässt erahnen, dass sie geometrisch geordnete Komplexe bilden, die entfernt an chemische Kristalle erinnern.

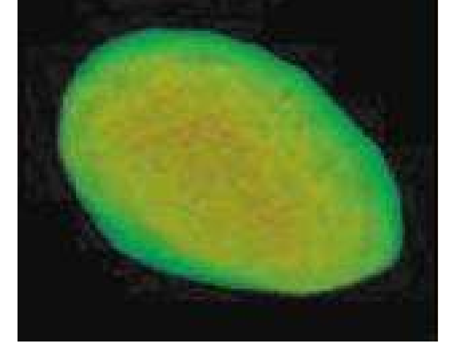
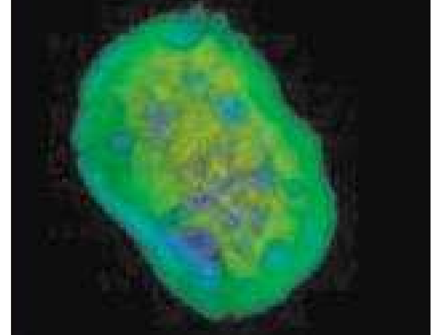
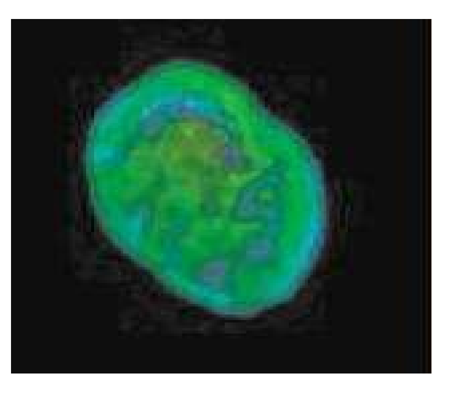
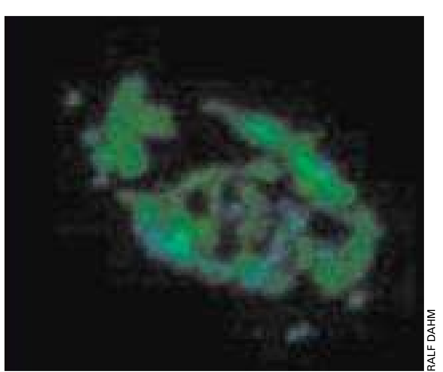
Der Preis für den klaren Blick

Wenn ein grauer Star – ein Katarakt – entsteht, fallen immer mehr dieser Kristalline zu Klumpen zusammen (siehe Kasten S. 30). Vielerlei kann trübe Flecken in der Linse verursachen, etwa eine häufige intensive UV- oder Wärmebestrahlung, freie Sauerstoffradikale, aber auch schon ein mehrere Wochen dauernder Flüssigkeitsmangel etwa bei starken Durchfällen. Bei Diabetes steigert ein über Jahre erhöhter Blutzuckerspiegel die Kataraktgefahr.

Mancher mag es für nichts Besonderes halten, wenn eine Zelle ihre sämtlichen Organellen verliert und doch am Leben bleibt. In Fachkreisen sorgten die Forschungsergebnisse an der Augenlinse hierzu allerdings für einigen Aufruhr. Viele Experten protestierten, als mehrere Wissenschaftlergruppen nach Mitte der 1990er Jahre den Verdacht äußerten, es scheine sich um einen unvollständigen Zellselbstmord zu handeln. Den programmierten Zelltod, den überzählige und irreparabel geschädigte Zellen selbst aktivieren, nennen Molekularbiologen seit dreißig Jahren Apoptose.

Normalerweise, so war die Vorstellung noch vor zehn Jahren, läuft das in jeder Zelle eingebaute Selbstmordprogramm unaufhaltsam bis zum Ende durch, wenn diese es aktiviert. Die Zelle scheint sich dabei selbst zu demontieren, bis sie zerfällt und von anderen Zellen aufgenommen wird. Diesen in den letzten Jahrzehnten recht gut untersuchten Mechanismus nutzt der Organismus in vielen Situationen. So ereignet sich ein solcher programmierter Tod unzählige Male während der Entwicklung und im erwachsenen Körper, um nicht mehr benötigte Zellen zu eliminieren. Auch irreparabel geschädigte Zellen können sich selbst umbringen – ein Mechanismus, der bei Krebs nicht mehr greift.

Im Allgemeinen werden Zellkern und Organellen dabei in einer bestimmten Abfolge abgebaut. Oft machen die Mitochondrien – die wegen ihres Sauerstoffanspruchs besonders empfindlichen Kraftwerke von Zellen – den Anfang. Der Zellkern löst sich in der Regel etwas

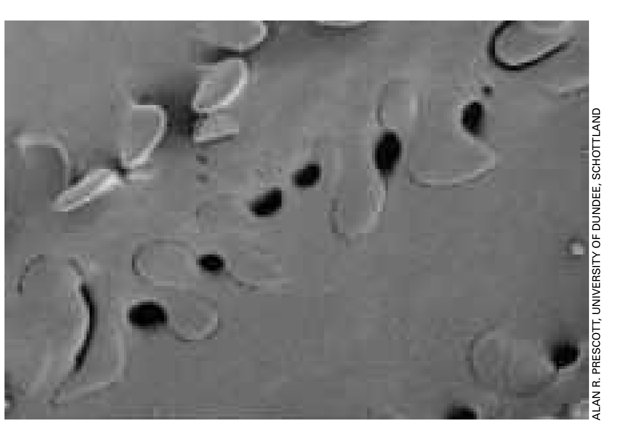





RALF DAHM

▲ Der Abbau der Zellkerne dauert mehrere Tage. Das sieht aus wie bei einem programmierten Zelltod, einer Apoptose: Kernhülle und die auf dem Bild nicht sichtbare DNA lösen sich gleichzeitig langsam auf.



RALF DAHM



ALAN R. PRESCOTT, UNIVERSITY OF DUNDEE, SCHOTTLAND

◀ Die mikroskopischen Aufnahmen zeigen Teile von Faserzellen aus der Augenlinse eines Rindes. Im linken Bild sieht man kurze Abschnitte der eng gestapelten Zellen (Ausschnitt wie im Kasten S. 27 oben rechts markiert). Im Bild rechts ist erkennbar, wie die Faserzellen sich verzahnen und so einen festen Zusammenhalt gewähren, wenn die Linse beim Fokussieren verformt wird.

später auf. Während einer regulären Apoptose zerfallen zudem das Zellgerüst sowie die Zellaußenmembran. Dass Zellen ihren einmal angestoßenen Untergang gezielt aufhalten könnten, schien vielen Forschern undenkbar.

Killerenzyme für den programmierten Zelltod

Etliche Studien lieferten inzwischen eine Reihe von Beweisen dafür, dass die Linsenzellen tatsächlich Mechanismen der Apoptose aktivieren. Es sieht genauso wie bei einem beginnenden programmierten Zelltod aus, wenn etwa ihre Mitochondrien oder ihr Zellkern langsam verschwinden (siehe Bilder links oben). Forscher haben mittlerweile auch verschiedene Hinweise darauf, dass sich dabei offenbar die gleichen molekularen Vorgänge abspielen. Beispielsweise treten in der Linse ebenfalls Caspasen in Aktion, die Killerenzyme der Apoptosemaschinerie. Zudem spricht manches dafür, dass die Faserzellen ihre innere Selbstzerstörung sogar in den gleichen Situationen anwerfen, wie sie bei einer regulären Apoptose unter anderem vorkommen.

Nach einer These von Steven Bassnett von der Washington-Universität in Saint Louis (Missouri) zerstören die Faserzellen ihr Innenleben, wenn ihre Mitochondrien ihnen wegen Sauerstoffmangels nicht mehr genügend Stoffwechselenergie bereitstellen können. Da die Linse keine Blutgefäße durchziehen, sondern alle Stoffe von außen her eindiffundieren müssen, beginnen die eingeschlossenen älteren Zellen bald zu darben, so die Überlegung. Je mehr neue Schichten sich außen über sie lagern, desto schlechter werden sie versorgt – bis ihre Mitochondrien schließlich streiken. Das könnte für die Zelle das Signal sein, ihre Organellen und den Zellkern aufzugeben. Ganz ähnlich reagieren nämlich andere Zellen auf Mitochondrienschäden – nur eben mit einem vollständigen Selbstmord.

Nach Bassnet könnte auch die hohe Milchsäurekonzentration in der Linse ein Signal für die Teilzerstörung darstellen. Unter Sauerstoffmangel gewinnen Zellen ihre Energie, indem sie aus Glukose Milchsäure herstellen. Bassnett postuliert, dass die Faserzellen ihr Selbstmordprogramm bei einer bestimmten Konzentration der Säure oder bei einem bestimmten Säuregrad aufrufen. Beide Mechanismen können aber nicht erklären, warum irgendwann in der jungen Linse die ersten Zellen ihren teilweisen Selbstmord einleiten.

Hinweise darauf, welche Moleküle in den sich ausdifferenzierenden Faserzellen nach dem Anstoß zum Selbstmord aktiv werden, fanden Klaus van Leyen vom Massachusetts General Hospital in Charleston und seine Kollegen. Unter anderem tritt das Enzym 15-Lipoxygenase in Aktion. Es bohrt sich in Membranen von Zellorganellen. Durch die dabei entstehenden Löcher dringen Proteasen ein, Proteine zerlegende Enzyme, die hierdurch nun die Organellen zerstören. Unbekannt ist noch, was die Lipoxygenase zum rechten Zeitpunkt auf den Plan bringt.

Bei manchen Krebszellen wie auch bei gesunden Zellen vermag der so genannte Tumor-Nekrose-Faktor eine Apoptose zu induzieren. Nach Michael Wride, heute an der Universität von Wales in Cardiff, und Esmond Sanders von der Universität von Alberta in Edmonton (Kanada) setzt dieser Faktor zumindest in Linsenzellkulturen den Abbau des Zellkerns in Gang. Ob Gleiches auch im Auge selbst stattfindet, wenn sich die Linse ausbildet, ist bisher nicht bekannt.

Was die Erbsubstanz DNA in den Linsenzellkernen betrifft, so identifizierte Sogo Nishimoto von der Universität Osaka (Japan) kürzlich bei Mäusen ein Enzym, das spezifisch dort aktiv wird und diese DNA zerlegt. Wenn den Nagern diese charakteristische so genannte DNAse fehlt, verlieren die Linsenzellen offenbar nicht ihre Zellkerne. Solche Mäuse sind bei der Geburt blind: Sie kommen mit einem Katarakt zur Welt. Ansonsten scheinen die Tiere keine Defekte zu haben, was wohl bedeutet, dass ihre anderen Zellen eine normale Apoptose durchführen können.

Trübe Augen von Geburt

Auch beim Menschen kommt es vor, dass Kinder mit einem grauen Star geboren werden. Manchmal geht die Missbildung auf eine Virusinfektion in der Schwangerschaft zurück. Besonders Röteln sind in dem Zusammenhang gefürchtet. Wie es scheint, verhindern Proteine des Virus den normalen Ablauf der Apoptose. Deswegen beseitigen die Linsenzellen ihre Organellen nicht und die Linse des Neugeborenen ist trüb. ▷

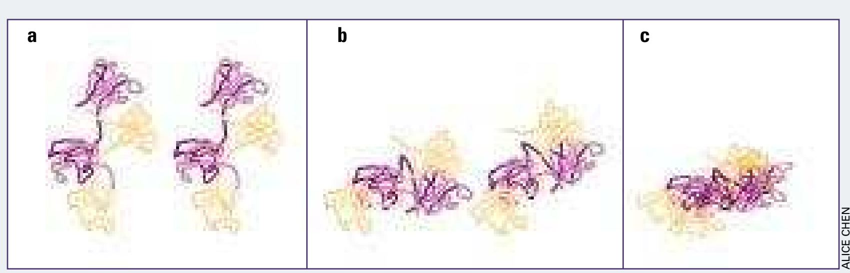
Linsentrübung durch beschädigte Proteine

Ein Katarakt oder grauer Star – eine Trübung der Augenlinse – entsteht oft altersbedingt, kann aber auch bei manchen Stoffwechselerkrankungen wie Diabetes auftreten. Ein angeborener Katarakt kann beispielsweise auf eine Infektion während der Schwangerschaft zurückgehen oder auf einem Erbdefekt beruhen.


SCIENCE PHOTO LIBRARY

Eine trübe Linse – wie hier zu sehen – streut das Licht, statt es auf die Netzhaut zu fokussieren.

In einer klaren Linse sind Kristalline genannte Proteine in großen Komplexen so regelmäßig angeordnet, dass Licht ungehindert passiert (a). Wenn diese Moleküle Schaden nehmen, bricht die Struktur zusammen (b). Je stärker beschädigte Kristalline miteinander verklumpen, umso mehr streuen sie das Licht – der betroffene Bereich der Linse trübt sich (c).



ALICE CHEN

Heute zweifelt kaum mehr jemand an der Beteiligung von Apoptosemechanismen bei der Entwicklung der Augenlinse. Die Frage ist aber immer noch, wie diese Zellen verhindern, dass sie dabei völlig zu Grunde gehen. Verfügen sie über einen zeitgenauen Bremsmechanismus? Das postulierten einige von uns schon vor Jahren. Manches im Verhalten der Linsenzellen spricht nämlich dafür, dass sie die Apoptoseprogramme ganz gezielt dafür einsetzen, ihre Ausdifferenzierung zu reifen Faserzellen zu steuern.

Genetische Faktoren für klare Linsen beim Zebrafisch

Denkbar wäre allerdings auch, dass die Zellen gar nicht irgendwelche Stoppvorgänge bemühen müssen. Vielleicht sind die unversehrten Strukturen und Moleküle von Zellgerüst und Außenmembran ohnehin vor dem Abbau gefeit. Möglicherweise erkennen die zerstörerischen Apoptoseenzyme sie nicht, weil sie sich biochemisch tarnen. Vorstellbar sind aber auch andere für die Apoptoseenzyme unüberwindliche Hindernisse. Eventuell hüllen die Kristalline die unentbehrlichen Proteine wie in einen Schutzmantel ein. Sie selbst sind zumindest für zerstörerische Apoptoseenzyme nicht angreifbar.

Ein unzeitgemäßer programmierter Zelltod beziehungsweise auch sein Unterbleiben gehören zu vielen Krankheitsbildern. Dazu zählen das Alzheimer- und das Parkinson-Syndrom wie auch Aids – und im umgekehrten Fall Krebs. Genaue Kenntnisse darüber, wie sich eine Apoptose einleiten, aber auch stoppen ließe, könnten neue Ansätze für Therapien erlauben. Vielleicht hilft die Augenlinse mit ihren überraschenden Eigenschaften weiter.

Zuerst einmal möchten wir besser verstehen, warum ein Katarakt entsteht und wie seine Ausbildung zu verhindern oder hinauszuzögern wäre. Das beträfe neben den älteren auch oft jüngere Menschen, selbst Kinder. Weltweit erblinden immer noch jedes Jahr viele Millionen an grauem Star.

Für die Zukunft versprechen wir uns viel von Forschungen an Modellorganismen. Beispielsweise gibt es etliche Mäuselinien, die Katarakte entwickeln, wie sie auch beim Menschen vorkommen. Unlängst ist noch ein weiterer Organismus hinzugekommen: der Zebrabärbling oder Zebrafisch. Er gehört heute zu den bevorzugten Tieren für Entwicklungsstudien bei Wirbeltieren – nicht zuletzt dank der Initiative von Christiane Nüsslein-Volhard vom Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen, die 1995 für ihre Untersuchungen an der Taufliege *Drosophila* zusammen mit zwei Kollegen den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin erhielt.

Zebrafische schlüpfen schon nach wenigen Tagen. Da die Embryonen relativ wenige Zellen aufweisen und durchscheinend sind, erkennt man bei ihnen Organdefekte gut. Etliche Forschergruppen konnten mittlerweile eine Anzahl von Missbildungen identifizieren, die auf genetischen Fehlern beruhen. Darunter sind auch Augendeformationen, die offensichtlich durch eine Entwicklungsstörung entstehen. Bei manchen Tieren geht die Linse komplett zu Grunde. Bei anderen bauen sich die Organellen in den Linsenzellen nicht ab. Es gibt Zebrafische, deren Katarakt einem grauen Star beim Menschen gleicht.

Die Hoffnung der Forscher ist nun, bei den Maus- und Zebrafischmutanten mit Augendefekten die Gene zu identifizieren, die normalerweise mitwirken, wenn sich eine klare Linse ausbildet. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Ralf Dahm arbeitet am Max-Planck-Institut für Entwicklungsbiologie in Tübingen. Er ist Projektmanager des EU-Forschungskonsortiums »ZF-MODELS«, das von diesem MPI aus koordiniert wird. Das Projekt soll Zebrafisch-Modelle etablieren, um mit deren Hilfe die Embryonalentwicklung von Wirbeltieren sowie menschliche Krankheiten zu untersuchen.

Zwischen glasklar und grauem Star. Von Ralf Dahm in: Biologie in unserer Zeit, Bd. 33, Heft 6, 2003, S. 342

Trübe Nebel und blinde Flecken. Von Ralf Dahm in: Gehirn und Geist, Heft 6, 2003, S. 62

Nuclear cataract caused by a lack of DNA degradation in the mouse eye lens. Von S. Nishimoto et al. in: Nature, Bd. 424, 2003, S. 1071

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Leben Viren?

Als biologische Gebilde in der Grauzone zwischen belebter und unbelebter Natur sind Viren nicht klar einzuordnen. In der Debatte hierüber wird leicht übersehen, welch fundamentale Bedeutung ihnen für die Evolution von Organismen bis hin zum Menschen zukommt.

Von Luis P. Villareal

Verschnupfte wissen, wie leicht man sich ein Virus einfängt. Vielleicht stufen sie die »Biester« noch irgendwie unter mikroskopisch kleine Krankheitserreger ein. Doch was ein Virus wirklich ist, werden die wenigsten sagen können – und befinden sich damit in guter Gesellschaft.

In den letzten hundert Jahren haben Wissenschaftler ihre Vorstellungen über das Wesen der Viren mehr als einmal grundlegend geändert. Ursprünglich als Giftstoffe, später als einfache Lebensformen angesehen, danach als Komplexe von Biomolekülen, gelten die Gebilde heute als Wanderer zwischen den Welten, irgendwo angesiedelt in der Grauzone zwischen belebter und unbelebter Natur. Aus eigener Kraft können sie sich zwar nicht vermehren, doch in den lebenden Zellen ihres Wirtsorganismus sehr wohl. Sie wirken sich erheblich auf seine Funktion aus, manchmal sogar auf sein Verhalten, wie etwa der Tollwuterreger. Ihre fundamentale Rolle in der Geschichte des Lebens wurde aber von Evolutionsbiologen bis in die jüngste Zeit verkannt – verständlich, wenn man bedenkt, dass Viren vorherrschend als unbelebt galten.

Viren sind in der Tat schwer zu fassen: Mit jedem Wechsel des Blickwinkels scheinen sie ihr Wesen zu verändern. Ins Visier gerieten sie zunächst im Zusammenhang mit Krankheiten – als vermeintliches Gift. Virus bedeutet im Lateinischen Gift oder Schleim. Im ausgehenden 19. Jahrhundert erkannten Forscher, dass einige Infektionen, darunter die Mosaikkrankheit bei der Tabakpflanze und die Maul- und Klauenseuche, von etwas verursacht wurden, das sich ähnlich wie Bakterien verhielt, jedoch viel kleiner war. Da die Erreger ganz offensichtlich biologischer Natur und von einem Erkrankten auf weitere Opfer übertragbar waren, wurden sie dann als einfachste Lebensformen mit eigenem Erbgut angesehen.

IN KÜRZE

▶ **Viren sind Parasiten**, die an der Grenze zwischen belebter und unbelebter Natur existieren. Sie enthalten Eiweißstoffe und Erbmoleküle, brauchen aber die Hilfe von Zellen, um sich zu vervielfältigen und zu verbreiten.

▶ Seit Jahrzehnten streiten sich die Wissenschaftler darüber, ob Viren **lebende Materie** sind oder nicht. Über diesen Zwist ging ein viel wichtigerer Aspekt unter: Viren haben **enormen Einfluss auf die Evolution**.

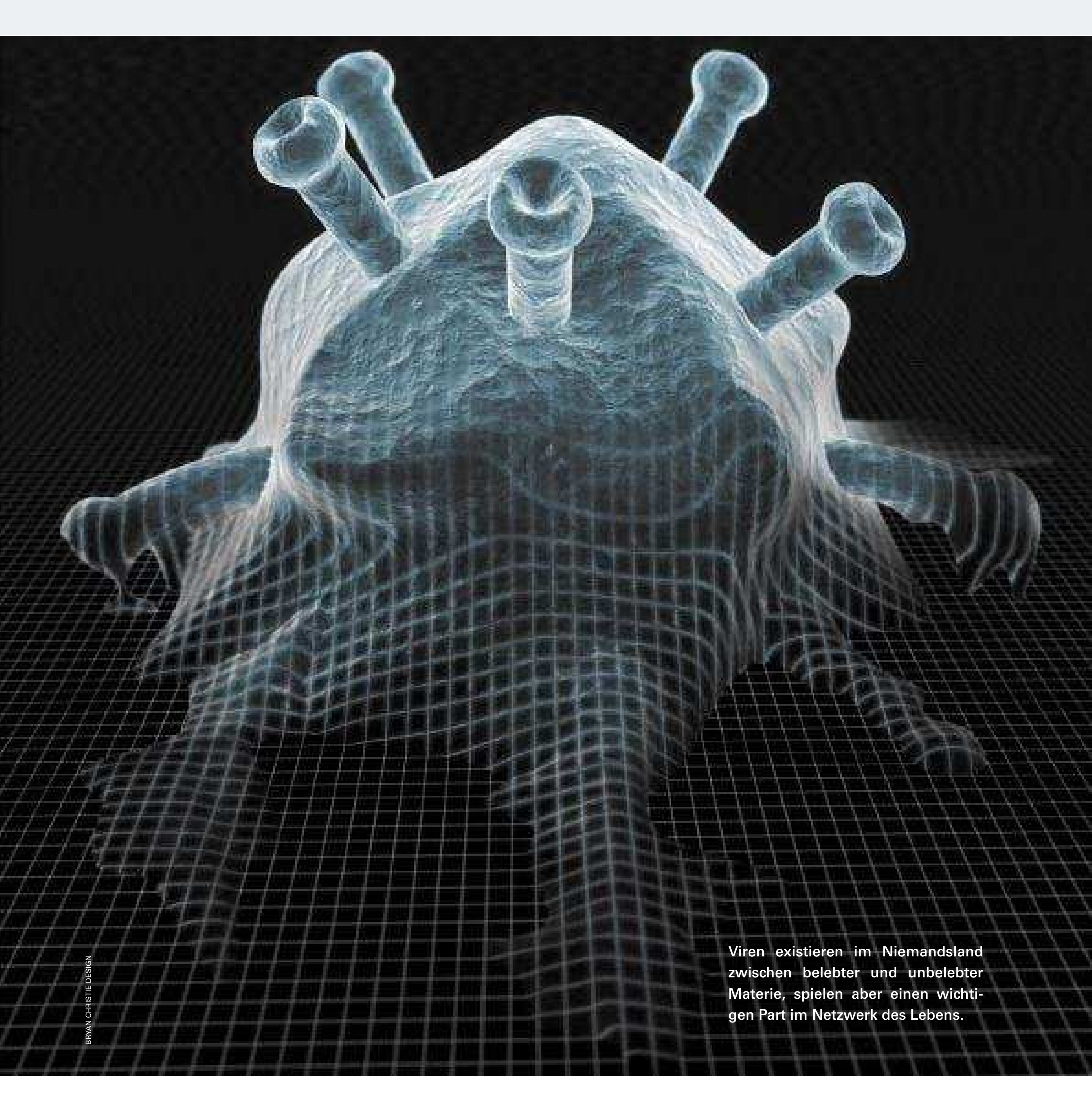
▶ Viren vermehren sich gewöhnlich in großer Zahl und mutieren leicht. Mit der Zeit bringt dieser Prozess viele neue Gene hervor. Gelegentlich kann ein **innovatives nützliches Virusgen** sich in das Erbgut einer Wirtszelle einnisten und zu einem permanenten Bestandteil ihres Genoms werden.

Ein unbelebter Kristall?

Als es aber Wendell M. Stanley und seinen Mitarbeitern von der heutigen Rockefeller-Universität in New York 1935 erstmals gelang, einen solchen Erreger – das Tabakmosaikvirus – zu kristallisieren, wurden Viren zu unbelebten Molekülkomplexen degradiert. Zwar handelte es sich um biologische Substanz, doch fehlten den Partikeln wesentliche Stoffwechselfunktionen, also für Leben charakteristische biochemische Aktivitäten.

Wie weitere Forschungen von ihm und anderen Biochemikern ergaben, bestanden Viren im Wesentlichen aus einer Proteinhülle, die Nucleinsäuren in Form von DNA oder RNA umschließt, unter Umständen aus noch weiteren Proteinen, die bei der Infektion nützlich sind. Das klang tatsächlich eher nach einem Chemiebaukasten als nach einem Organismus. Bezeichnenderweise erhielt Stanley 1946 anteilig den Nobelpreis für Chemie, nicht etwa für Physiologie oder Medizin.

Infiziert ein Virus jedoch eine Zelle, die dann als Wirtszelle bezeichnet wird, ist es dort alles andere als inaktiv. Es streift seine Hülle ab, setzt sein Erbmaterial frei und veranlasst die Synthesemaschinerie der Zelle, die virale DNA oder RNA zu vervielfältigen und anhand der



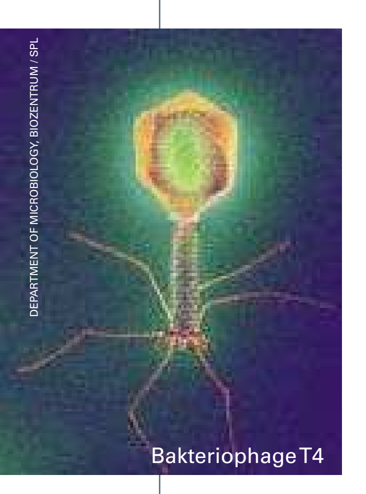
Viren existieren im Niemandsland zwischen belebter und unbelebter Materie, spielen aber einen wichtigen Part im Netzwerk des Lebens.

enthaltenen Instruktionen entsprechende Proteine zu produzieren. Die neu synthetisierten Bauteile fügen sich von allein zu Viruspartikeln zusammen, die weitere Zellen infizieren können. Diese Verhaltensweisen veranlassten schließlich viele Wissenschaftler, Viren als ambivalente Existenzen zwischen Chemie und Leben zu betrachten. Poetischer drückten sich kürzlich zwei Experten ihres Fachs aus: Viren führten eine Art »geborgtes Leben«.

Angesichts der lange vertretenen Auffassung, Viren seien nichts anderes als kompakte Pakete aus biologischen Makromolekülen, mutet eines fast wie Ironie des Schicksals an: Bedienten sich doch ausgerechnet die Biologen der viralen Aktivitäten in Wirtszellen, um herauszufinden, wie die Bauanweisung für Proteine auf den Erbmolekülen verschlüsselt ist. Im Grunde baut die moderne Biologie auf einem Fundament von Erkenntnissen auf, die mit Hilfe von Viren gewonnen wurden.

Nachdem inzwischen die meisten essenziellen Komponenten der Zellen kristallisiert und strukturell analysiert sind, ist es für heutige Molekularbiologen selbstverständlich, den zellulären Stoff- ▷

Leben – mehr als bloß ein Wort?


DEPARTMENT OF MICROBIOLOGY, BIOZENTRUM / SPL

Bakteriophage T4

»Leben« und »lebend« sind Begriffe, welche die Wissenschaft der Alltagssprache entliehen hat. Noch vor recht kurzer Zeit kam man befriedigend damit zurecht, da der Forscher – schon gar nicht der einfache Mann – kaum darüber nachdachte und gewiss nie genau wusste, was er damit eigentlich meinte. Inzwischen hat man jedoch Systeme entdeckt und untersucht, die nicht so eindeutig lebendig oder tot sind. Daher ist es nötig, die Begriffe jetzt zu definieren oder in der Wissenschaft nicht mehr zu verwenden und andere einzuführen.

Norman Pirie, britischer Virologe, um 1934

Du glaubst, Leben bedeute nur nicht so tot zu sein wie ein Stein.

George Bernard Shaw, irischer Schriftsteller, »Die Heilige Johanna« 1923

▷ wechsel als biochemische Maschinerie anzusehen – mit verschiedenen Subkomponenten wie Mitochondrien als Kraftwerke, Ribosomen als Proteinsynthesefabriken, Membranen als Trennwände und Kontaktflächen, DNA als Datenspeicher und Proteine als Bauelemente und Katalysatoren. Die meisten ihrer Zunft grübeln kaum mehr darüber, ob Viren nun leben oder nicht. Ihnen dürfte das so müßig erscheinen, wie sich über die Lebendigkeit eines der genannten Zellbestandteile den Kopf zu zerbrechen.

Da sie das Ganze sozusagen aus allernächster Nähe betrachten, haben sie nur im Fokus, wie Viren in den Stoffwechsel der Zellen eingreifen und wie sie Krankheiten verursachen. Die weiter reichenden Fragen, was Viren zur Geschichte des Lebens auf unserem Planeten beigetragen haben, sind bislang weit gehend unbeantwortet geblieben, teils noch nicht einmal gestellt.

Die andere, scheinbar simple Frage, ob Viren »lebendig« seien oder nicht, höre ich oft von meinen Studenten. Eine einfache Antwort darauf gibt es wohl deshalb nicht, da damit ein weit grundlegenderes Problem einhergeht, nämlich die präzise wissenschaftliche Definition des Begriffs Leben an sich.

In den meisten Fällen besteht Übereinkunft, dass neben der Fähigkeit zur Reproduktion gewisse weitere Eigenschaften erfüllt sein müssen. Leben sei beispielsweise ein Zustand, der mit irgendeiner Form von »Geburt« beginne und mit dem Tod ende. Ferner halten Biologen eine gewisse biochemische Autonomie für erforderlich, die es den Organismen ermöglicht, die zur Selbsterhaltung benötigten Moleküle zu produzieren und Energie zu gewinnen. Der Grad an Autonomie gibt bei den meisten Definitionen für Leben den Ausschlag.



Viren hingegen sind in fast jeder Hinsicht biochemische Parasiten. Sie nutzen von der Zelle produzierte Ausgangsstoffe und Energie für die Synthese und Montage eigener Bestandteile, sogar für alle anderen biochemischen Aktivitäten, die ihre Vermehrung und Weiterverbreitung ermöglichen (siehe Kasten rechts). Man könnte also schließen, dass Viren zwar all diese Prozesse lenken, selbst aber unbelebte Parasiten lebender Stoffwechselsysteme sind. Allerdings mag es fließende Übergänge geben zwischen dem, was eindeutig lebt und was nicht.

Ohne kritische Komplexität

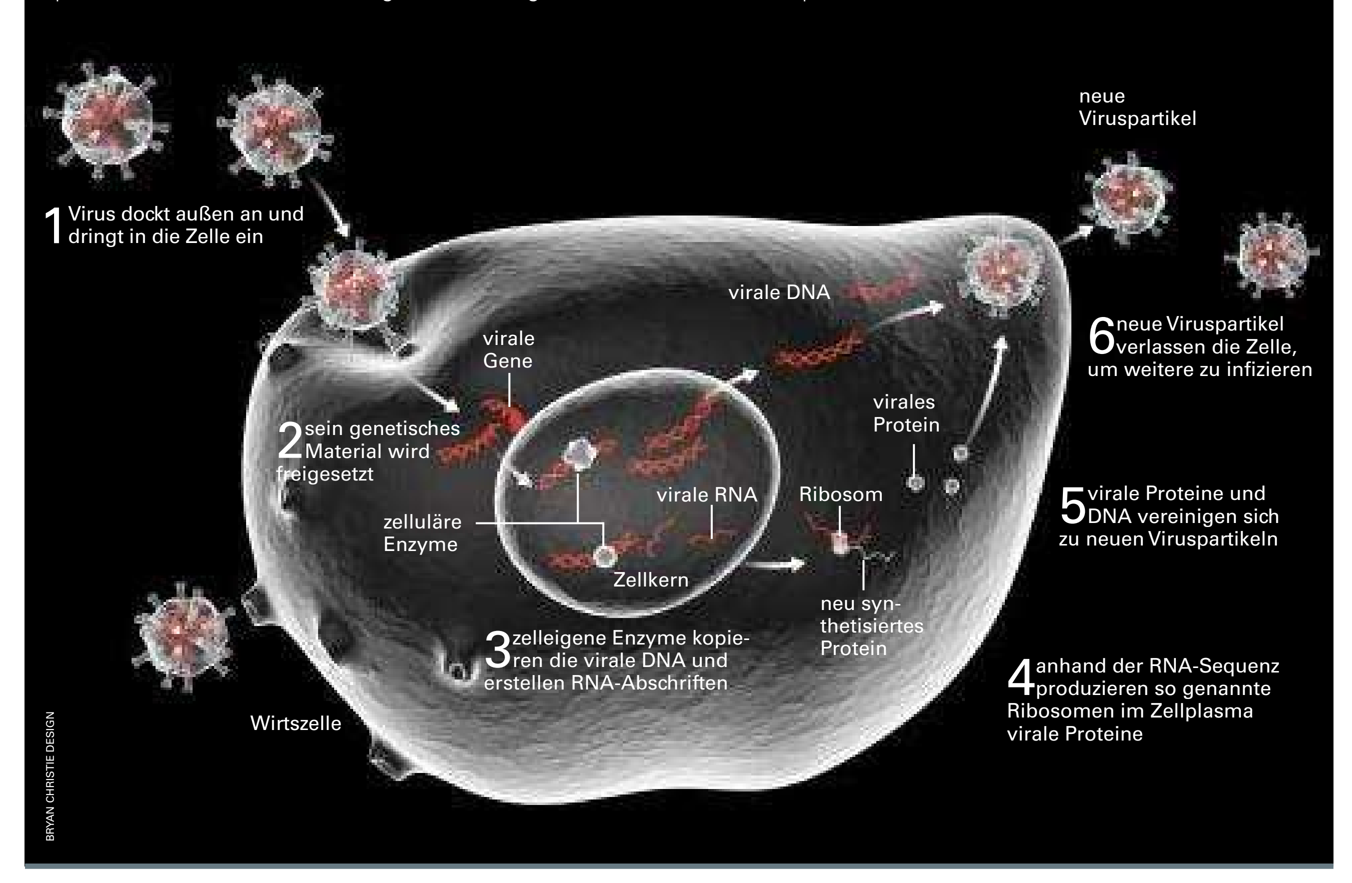
Ein Felsbrocken lebt nicht, ebenso wenig eine Hülle voller stoffwechselaktiver Enzyme ohne genetisches Material und ohne Fähigkeit zur Reproduktion. Ein Bakterium hingegen ist ein lebender Organismus. Zwar besteht es nur aus einer einzigen Zelle und besitzt nicht einmal einen Zellkern als Tresor für sein Erbmaterial, doch erzeugt es alles Nötige an Energie und biochemischen Komponenten und kann sich vermehren.

Aber was ist mit einem Pflanzensamen? Man könnte ihn als nicht lebend ansehen. Allerdings: Als vergängliches Zwischenstadium des pflanzlichen Lebenszyklus ist ihm die Möglichkeit zukünftigen Lebens eigen. So betrachtet gleichen Viren mehr einem Samen als einer Zelle. Auch ihnen wohnt ein gewisses Potenzial inne, das geweckt werden kann, doch im Gegensatz zum Samen, der zur frei lebenden Pflanze heranwächst, erreichen sie nie den Zustand höheren autonomen Daseins.

Aus einem anderen Blickwinkel betrachtet ist Leben eine emergente Eigenschaft eines Komplexes aus gewissen unbelebten Komponenten. Als Emergenz bezeichnen Philosophen das »Auftauchen« völlig neuer Eigenschaften, so genannter Systemeigenschaften, bei der Bildung eines Systems. Auch Bewusstsein ist ein Beispiel für ein emergentes komplexes System. Wie der Zustand Leben erfordert es ein kritisches Maß an Komplexität oder Interaktion, damit es überhaupt auftreten kann. Ein einzelnes Neuron, auch ein lokales Netzwerk von Neuronen hat kein Bewusstsein, das menschliche Gehirn als Ganzes jedoch ist sich seiner selbst bewusst. Allerdings kann auch das biologisch noch lebende Gehirn die Eigenschaft des bewussten Seins einbüßen.

Wie Viren sich vermehren

Als was immer man Viren auch einstuft, ein Kriterium für Leben erfüllen sie jedenfalls: Sie können sich vermehren – wenn auch nur mit Hilfe einer Wirtszelle. Das Schema zeigte die Replikation eines Virus, dessen Erbgut wie bei Organismen üblich aus doppelsträngiger DNA besteht. Die Prozesse weichen bei verschiedenen anderen Typen von Viren in einzelnen Aspekten voneinander ab, sind jedoch Variationen des gleichen Prinzips.



Analog betrachtet sind weder einzelne Gene und Proteine der Viren noch der Zellen an sich lebendig. Eine entkernte Zelle ist insofern einem hirntoten Menschen vergleichbar, als sie die volle, kritische Komplexität eingebüßt hat. Leben ist demnach ein emergenter komplexer Zustand eines Systems, das im Prinzip aus gleichartigen Grundkomponenten besteht wie ein Virus – nur dass ein Virus keine kritische Komplexität erreicht. So betrachtet sind Viren zwar nicht völlig lebendig, doch wohl mehr als nur tote Materie: Sie stehen an der Schwelle zur Domäne des Lebendigen.

Wie dicht davor, zeigt die im Oktober 2004 veröffentlichte Erbgutanalyse des größten bekannten Vertreters. Das Mimivirus, erst 1992 entdeckt, bringt es auf die Größe eines kleinen Bakteriums und befällt Amöben. Didier Raoult und seine Kollegen von der Mittelmeer-Universität in Marseille stießen auf zahlreiche Gene, die man zuvor nur von zellulären Organismen kannte. Einige dieser Gene tragen beispielsweise die Bauanweisung für Enzyme, die beim Aufbau der viralen Proteine mitwirken. Dies mag es dem Virus erleichtern, das Vermehrungssystem seiner Wirtsamöbe zu eigenen Zwecken zu missbrauchen. Wie die Forscher anmerkten, stellt die enorm komplexe genetische Ausstattung des Mimivirus die etablierte Grenze zwischen Viren und zellulären parasitischen Mikroorganismen in Frage.

Stiefkinder der Evolutionsforscher

Mancher mag die Diskussion um den Status von Viren als bloße akademische Übung ansehen, als hitzige rhetorische Debatte, die letztlich ohne wesentliche Konsequenzen bleibt. Ich persönlich halte die Frage, ob Viren leben, für wesentlich. Denn die Antwort beeinflusst, wie Biologen die Mechanismen der Evolution betrachten.

Viren haben ihre eigene Evolutionsgeschichte, die bis zu den Ursprüngen der Zellen zurückreicht. Einige Reparatur-Enzyme, die etwa beschädigte DNA ausbessern oder Schäden von aggressiven Sauerstoffradikalen beheben, kommen nur bei ganz bestimmten Viren vor und existieren wohl schon seit Jahrmilliarden in weit gehend unveränderter Form (siehe Kasten S. 36 unten).

Die meisten Evolutionsbiologen vertreten trotzdem noch immer die Auffassung, weil Viren nicht leben, seien diese für das Verständnis der Evolution nicht weiter von Bedeutung. Ihrer Meinung nach stammen virale Gene von zellulären Vorläufern ab, die dem Wirtsgenom abtrünnig wurden, sich eine Proteinhülle zulegten und zu Parasiten verkamen. ▷

▷ Wer aber die Viren aus dem Netz des Lebens ausklammert, dem entgeht leicht, welch wichtige Beiträge sie zum Entstehen und Überleben vieler Spezies geleistet haben können. So umfasst das 2002 erschienene Werk »The Oxford Encyclopedia of Evolution« 1205 Seiten – nur vier davon sind den Viren gewidmet.

Zwar bestreitet kein Evolutionsbiologe, dass Viren eine gewisse Rolle in der Entwicklungsgeschichte spielten, doch meist werden sie, da für unbelebt gehalten, als eine Art Umweltfaktor angesehen, der ähnlich wie etwa eine Klimaveränderung einen äußeren Selektionsdruck ausübt. Individuen, die auf Grund ihrer zufällig günstigen genetischen Ausstattung am besten mit der Herausforderung fertig werden, haben die höchsten Chancen, zu überleben, sich fortzupflanzen und so ihre Gene an künftige Generationen weiterzugeben.

Heimliche Vermehrung

Man darf jedoch nicht vergessen, dass Viren genetische Information mit lebenden Organismen austauschen, somit Bestandteil des genetischen Netzwerks des Lebens sind. Viele Ärzte, aber auch nicht wenige Evolutionsbiologen mag es überraschen, dass die meisten bekannten Viren keine Krankheiten verursachen und als harmlose Untermieter im Wirtsorganismus überdauern. Sie nisten sich in den Wirtszellen ein, bleiben für lange Zeit inaktiv oder nutzen den Replikationsapparat der Zelle, um sich langsam und ohne großes Aufsehen zu vermehren. Solche Viren haben zahlreiche Mechanismen entwickelt, mit denen sie der Vernichtung durch die Immunabwehr entgehen. Es gibt praktisch keine bekannte Komponente des Immunsystems, die nicht von irgendeinem Virus manipuliert würde.

Wie Phönix aus der Asche auferstehen

Gerade weil Viren die Niederungen zwischen belebter und unbelebter Natur einnehmen, vermochten sie einige bemerkenswerte Eigenschaften zu entwickeln. So reproduzieren sie sich zwar normalerweise nur in lebenden Zellen, einige Viren jedoch können auch praktisch tote Zellen als Wirte nutzen und sie unter Umständen sogar reanimieren. Raffinierte genetische Mechanismen ermöglichen ihnen zudem, gelegentlich selbst nach Zerstörung ihres Genoms in ihr »geliehenes« Leben zurückzukehren.

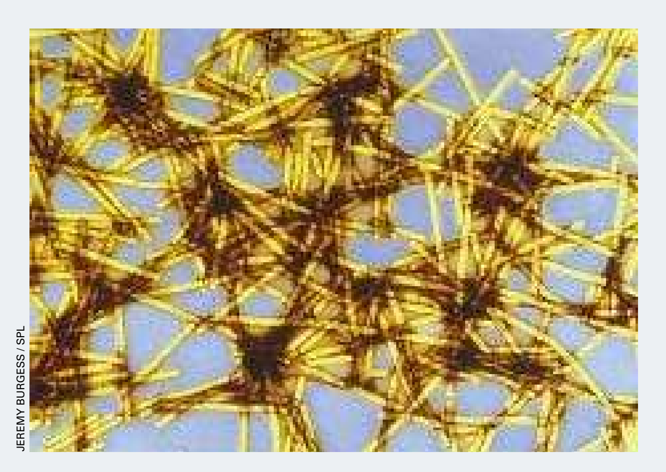
Eine Zelle mit zerstörtem Erbgut gilt als tot, denn es fehlen ihr die zur Synthese lebenswichtiger Proteine und zur Teilung benötigten genetischen Instruktionen. Viren hingegen können die verbleibende zelluläre Maschinerie im Zytoplasma noch nutzen, um ihr eigenes Erbgut vervielfältigen und virale Proteine herstellen zu lassen. Die Fähigkeit, in praktisch toten Zellen zu wachsen, ist vor allem bei Viren zu beobachten, die einzellige, oft marine Organismen infizieren. Auf unserem Planeten existiert eine fast unvorstellbare Zahl von Viren. Nach gegenwärtigen Schätzungen beherbergt allein das Meer insgesamt etwa 10^{30} Viruspartikel – in den Zellen von Wirtsorganismen und im freien Wasser.

Gewöhnliche Bakterien, aber auch photosynthetisch aktive Cyanobakterien (früher Blaualgen genannt) und echte Algen gehen oft unter, wenn die ultraviolette Strahlung der Sonne ihre DNA schädigt. Einige Viren bringen – indirekt in Form der Bauanleitung oder direkt als Protein – eigens Enzyme mit, die diverse Wirtsmoleküle reparieren können, zur Wiederbelebung sozusagen.

Ein Beispiel: Wird bei Cyanobakterien ein bestimmtes zentrales Photosynthese-Enzym durch zu starke Sonneneinstrahlung geschädigt und nicht mehr hinreichend nachproduziert, kommt der Stoffwechsel der Zelle zum Erliegen. Vor zwei Jahren entdeckten Forscher im genetischen Gepäck von Viren, die Cyanobakterien befallen, eine eigene, wesentlich UV-resistentere Version des Enzyms. Das virale Photosynthese-Enzym kann die Funktion des zerstörten Wirtsenzyms übernehmen – und damit die Produktion von Energie sicherstellen, die das Virus für seine Vermehrung braucht.

Stärkere ultraviolette Strahlung vermag allerdings auch diese und andere Vertreter der Viren zu zerstören. UV-Licht wird daher in Labors häufig zur Virusinaktivierung eingesetzt. Doch dies muss für ein Virus noch nicht das Ende sein. Durch den Mechanismus der Multiplex-Reaktivierung kann es manchmal Form und Funktion wiedererlangen. Enthält nämlich eine Zelle mehr als ein Exemplar inaktivierter Viren, wird aus mehreren noch intakten Puzzleteilen unter Umständen ein komplettes Virusgenom zusammengesetzt. Diese Möglichkeit der Rekombination nutzen Forscher übrigens aus, um artifizielle Viren im Labor zu konstruieren.

Es geht aber auch ganz ohne Rekonstruktion: Verschiedene defekte Viren können sich ergänzen, indem jedes ein anderes nötiges Protein zur Vermehrung in der Zelle beisteuert. Bei dieser so genannten Komplementation können Viruspartikel mit immer noch defektem Genom entstehen, die sich nur wieder mit Hilfe anderer viraler Partner, also nicht autonom weitervermehren. Viren sind die einzigen biologischen Systeme, die wie der sagenhafte Phönix – zumindest manchmal – aus ihrer Asche wiederauferstehen.



JEREMY BURGESS / SPL

◀ Tabakmosaikviren sind stäbchenförmige Gebilde, die sich oft zu kristallinen Aggregaten zusammenlagern. In lebenden Zellen der Tabakpflanze werden sie jedoch wieder biologisch aktiv.

Auch kann das Genom mancher Viren sich dauerhaft in das Erbgut des Wirts integrieren und im Lauf der Zeit sogar zu einem unverzichtbaren Bestandteil des Wirtsgenoms werden. Viren wirken sich daher sicherlich schneller und unmittelbarer auf die Evolution aus als externe Faktoren, die lediglich unter sich langsamer anhäufenden Erbgutvarianten selektieren. Ihre gewaltige Zahl und ihre schnelle Replikations- und Mutationsrate machen Viren zur bedeutendsten Quelle genetischer Innovation, indem sie ständig neue Gene »erfinden«. Nützliche Erbfaktoren viralen Ursprungs können sich über Speziesgrenzen hinaus verbreiten und zum evolutiven Wandel beitragen.

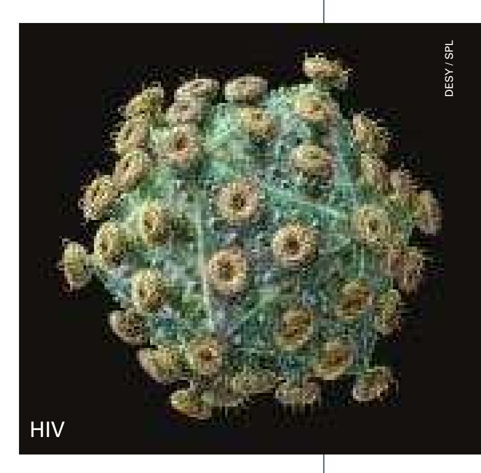
Im menschlichen Genom fanden sich – so das Humangenom-Konsortium – zwischen 113 und 223 Gene, die auch im Erbgut von Bakterien vorkommen, nicht aber bei anderen gut untersuchten Organismen, wie der einzelligen Bäckerhefe, der Taufliege und dem Fadenwurm *Caenorhabditis elegans*. Manche Wissenschaftler glauben, diese Lebewesen, die sich nach den Bakterien, aber vor dem Menschen entwickelten, hätten die Gene im Verlauf ihrer Evolution verloren. Andere meinen hingegen, bakterielle Eindringlinge hätten die Erbfaktoren direkt in die menschliche Stammlinie eingeschmuggelt.

Victor DeFillipis vom Institut für Impfstoffe und Gentherapie der Oregon Health Sciences University in Portland und ich schlagen eine dritte Alternative vor: Solche Gene könnten ursprünglich aus Viren stammen, die einst zwei ganz verschiedenartige Wirtslinien – etwa Bakterien und Wirbeltiere – zu besiedeln verstanden und dabei ihre »Erfindung« der Menschheit wie der Bakterienwelt vermachten.

Ein Schwanz, der mit dem Hund wedelt

Ob Viren als Organismen angesehen werden sollten oder nicht, ist Geschmackssache.
André Lwoff, französischer Nobelpreisträger, 1962

Das ureigenste Wesen eines Virus ist seine fundamentale Verquickung mit der genetischen und metabolischen Maschinerie seines Wirtes.
Joshua Lederberg, amerikanischer Nobelpreisträger, 1993


DESY / SPL

HIV

Fast hundert Jahre lang ließen sich Biologen durch den Disput um die Frage ablenken, ob Viren eigentlich Organismen sind. Die Kontroverse beruht weit gehend auf der Verallgemeinerung, die sich in der zweiten Hälfte des neunzehnten Jahrhunderts durchsetzte, Zellen seien die kleinsten Einheiten allen Lebens. Viren sind einfacher als Zellen, also können sie nach dieser Logik keine Lebewesen sein. Diese Argumentation ist jedoch nichts anderes als der Schwanz eines Dogmas, der mit dem semantischen Hund wedelt.
Paul Ewald, amerikanischer Evolutionsbiologe, 2000

Grundmuster für alle lebenden Zellen

Philip Bell von der Macquarie-Universität in Sydney (Australien) und andere Forscher, darunter auch ich, gehen noch weiter. Wir meinen, dass der membranumhüllte Zellkern – der Bakterien fehlt, aber die Zellen aller höheren Organismen einschließlich des Menschen auszeichnet – viralen Ursprungs ist. Allein mit einer allmählichen Umwandlung einer einfachen Zelle in eine mit echtem Kern lässt sich seine Entstehung nicht zufrieden stellend erklären. Plausibler ist für uns seine Entwicklung aus einem großen DNA-Virus, das in bakterienartigen Zellen persistierte.

Ein interessanter Befund an Genen für Kopierenzyme der DNA stützt diese Hypothese: Die DNA-Polymerase des Bakteriophagen T4 – das Virus infiziert Bakterien (siehe Abbildung S. 34 oben) – ist auf genetischer Ebene eng mit den entsprechenden Enzymen verwandt, die bei höheren Organismen und den sie infizierenden Viren vorkommen. Auch Patrick Forterre von der Universität Paris-Süd kam bei seiner Analyse entsprechender Enzymgene zu dem Schluss, dass die in höheren Organismen vermutlich viralen Ursprungs sind.

Viren haben Einfluss auf alle Lebewesen, von einzelligen Mikroben bis zum Menschen, und entscheiden oft über Leben und Tod. Zugleich entwickeln sie sich selbst weiter. Neue Viren wie der Aids-Erreger HIV (siehe Abbildung oben) sind womöglich die einzigen biologischen Entitäten, die so rasch entstehen, dass wir ihre Evolution in Echtzeit verfolgen können.

Viren sind so etwas wie die sich ständig wandelnde Grenze zwischen biochemischer und biologischer Welt. In dem Maße, wie immer mehr Genome von Organismen entziffert werden, sollte auch deutlicher zu erkennen sein, was dieser uralte und dennoch dynamische Genpool der Viren dazu beigetragen hat. Der Phagenforscher und spätere Nobelpreisträger Salvador Luria schrieb schon 1959: »Geben uns Viren, wenn sie mit dem Wirtsgenom verschmelzen und sich aus ihm wieder herauslösen, nicht das Gefühl, die Komponenten und Prozesse zu beobachten, die im Verlauf der Evolution die erfolgreichen genetischen Grundmuster aller lebenden Zellen schufen?« Gleichgültig ob wir Viren also für lebendig halten oder nicht, es ist an der Zeit, sie in ihrem natürlichen Kontext zu akzeptieren und zu untersuchen – im Netzwerk des Lebens. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE


Luis P. Villareal ist Direktor des Virusforschungszentrums der Universität von Kalifornien in Irvine. Nach seiner Promotion arbeitete er an virologischen Projekten im Labor des Nobelpreisträgers Paul Berg an der Universität Stanford. In seiner jetzigen Position etabliert Villareal unter anderem Programme für rasche Abwehrmaßnahmen gegen bioterroristische Bedrohungen.

Viruses and the evolution of life. Von L. Villareal. ASM Press (im Druck)

Lateral gene transfer or viral colonization? Von Victor DeFilippis und L. Villareal in: Science, Bd. 293, S. 1048, 2001

DNA virus contribution to host evolution. Von L. P. Villareal in: Origin and evolution of viruses. Von E. Domingo et al. (Hg.), Academic Press 1999

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Stabil in der Schwebe

Seit den 1930er Jahren ist eine einfache Methode bekannt, mit der man Gegenstände stabil im Magnetfeld schweben lassen kann – doch erst jetzt finden die Forscher dafür auch praktische Anwendungen.

Von Ronald E. Pelrine

Magneten üben Kräfte aufeinander aus, ohne sich zu berühren – das fasziniert die meisten Kinder und sogar Erwachsene. Vom Staunen über dieses seltsame Phänomen ist es nur ein kleiner Schritt bis zur Frage, ob man vielleicht mit der Kraft eines Magneten einen zweiten schweben lassen könnte. Doch wie man es auch anstellt: Die Schwerkraft gewinnt immer. Zwar lässt sich ein Magnetfeld so arrangieren, dass es an einer bestimmten Stelle das Gewicht eines anderen Magneten gerade kompensiert. Doch die geringste Störung zerstört das delikate Gleichgewicht und bringt den schwebenden Körper zum Absturz.

Dass es grundsätzlich nicht möglich ist, einen Magneten in einem statischen Magnetfeld stabil und frei schweben zu lassen, hat der britische Physiker und Geistliche Samuel Earnshaw bereits 1842 festgestellt. Das heute nach ihm benannte Theorem gilt übrigens auch für eine Ladung in einem statischen elektrischen Feld.

Theoretisch begründen lässt sich Earnshaws Theorem anhand der fundamentalen Gleichungen, mit denen der Brite James Clerk Maxwell Mitte des 19. Jahrhunderts die elektromagnetischen Erscheinungen beschrieb. Freilich muss man die Maxwell'schen Gleichungen nicht beherrschen, um Earnshaws Theorem zu verstehen. Man muss lediglich wissen, dass sich das Verhalten eines Magneten mit einer physikalischen Größe namens »magnetisches Potenzial« beschreiben lässt. Dieses Potenzial ähnelt anderen vertrauten Formen der potenziellen (also gespeicherten) Energie.

Potenzial ohne Tal

Betrachten wir beispielsweise eine Kugel auf einer welligen Fläche. Die Kugel rollt in die Richtung, in der die potenzielle Energie am schnellsten abfällt. Sie kommt erst zum Stillstand, wenn sie einen Ort erreicht, an dem das Potenzial ein lokales Minimum aufweist – am flachen Boden einer Mulde. Ganz ähnlich würde ein Magnet nur dann stabil schweben, wenn er sich in einem Minimum des magnetischen Potenzials befände. Doch aus den Maxwell'schen Gleichungen folgt, dass das magnetische Potenzial an jedem Punkt im Raum dem Mittelwert des Potenzials der umgebenden Punkte entspricht. Darum kann diese Größe nirgends ein lokales Minimum einnehmen: In direkter Nachbarschaft muss es stets sowohl Punkte mit höherer als auch mit niedrigerer Energie geben (Bild auf S. 40 oben).

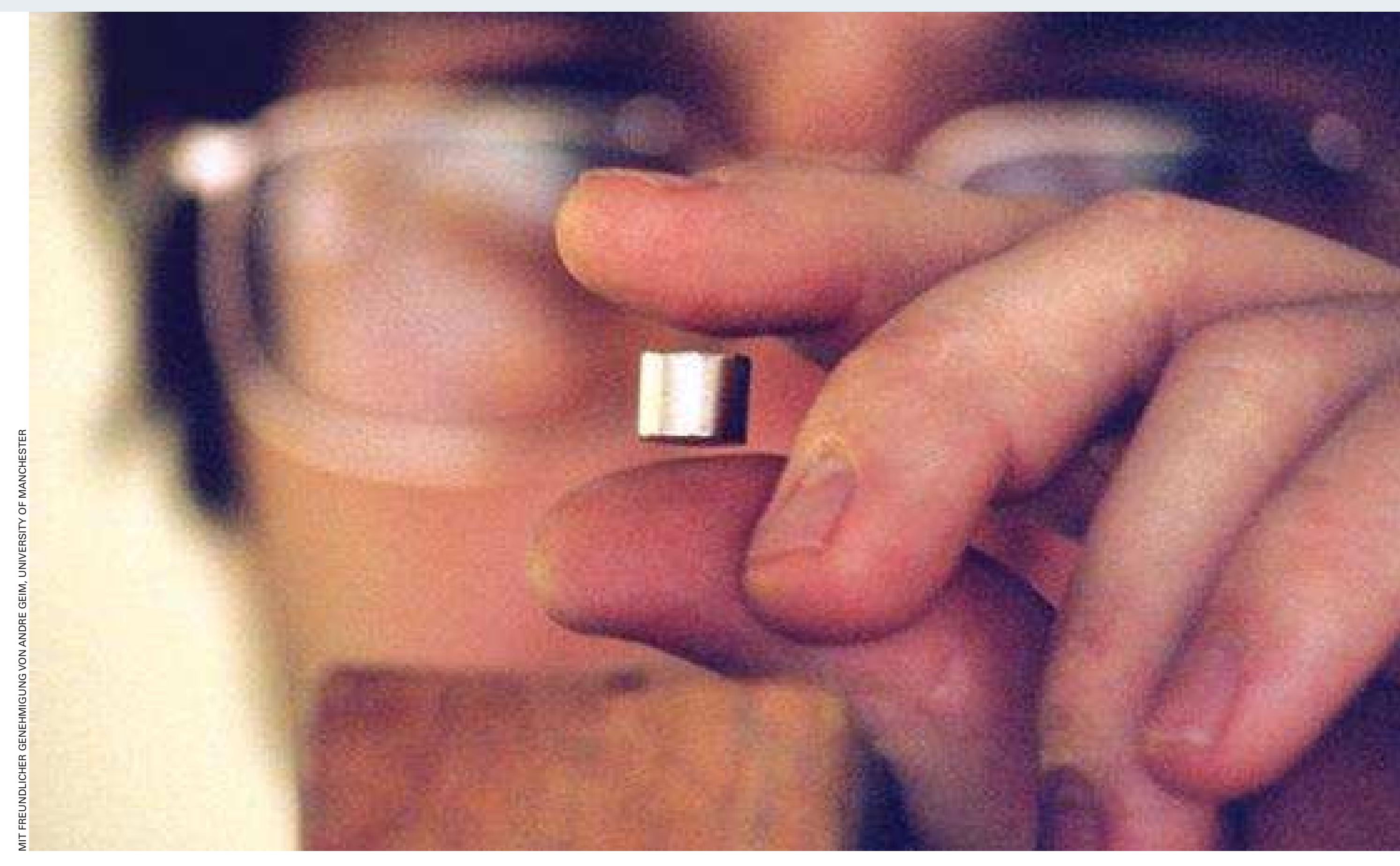
Aus diesem Grunde sahen sich die Forscher nach anderen Möglichkeiten um, Gegenstände schweben zu lassen. Meistens greifen sie auf dynamische, also zeitlich variable Magnetfelder zurück, denn für diese gilt das Earnshaw-Theorem nicht. So lässt sich mit einem aktiven Regelkreis über Sensoren die genaue Position des schwebenden Körpers messen und das Magnetfeld beständig nachregulieren, sodass er in der Schwebe bleibt. Diese Methode findet seit Jahrzehnten technische Anwendung in aktiven Magnetlagern und in Magnetschwebebahnen wie dem Transrapid. Obwohl sie funktionieren, haben diese Systeme doch gravierende Nachteile: Sie verbrauchen Energie und sind recht komplex, was sich nachteilig auf Preis und Fehleranfälligkeit auswirkt.

Doch gibt es einen Weg, einen Magneten ohne solche Komplikationen schweben zu lassen. Um diese Methode zu verstehen, ist es wichtig, den Unterschied zwischen den drei verschiedenen Arten von Magnetismus zu kennen. Physiker unterscheiden nämlich ferromagnetische, paramagnetische und diamagnetische Materialien.

Ferromagnetische Substanzen – wie zum Beispiel Eisen – lassen sich häufig dauerhaft magnetisieren. Die in Haushaltswarenläden erhältlichen Permanentmagnete zum Anpinnen von Notizzetteln bestehen aus solchen Ferromagneten. Paramagnetische Materialien wie etwa das Mineral Biotit hingegen sind

IN KÜRZE

▶ **Physikalische Gesetzmäßigkeiten** verhindern das freie, stabile Schweben eines magnetischen Körpers in einem statischen Magnetfeld.
▶ Bisherige Anwendungen der Schwebetechnik – wie zum Beispiel beim Transrapid – nutzen deshalb **dynamische Systeme** mit teurer und fehleranfälliger Regeltechnik, um Instabilitäten auszugleichen.
▶ Mit diamagnetischen Materialien lassen sich hingegen **eigenstabile Schwebezustände** erreichen. Diese ermöglichen kostengünstige und vielfältige Anwendungen.



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON ANDRE GEIM, UNIVERSITY OF MANCHESTER

Kein Zaubertrick: Der kleine Magnet schwebt frei zwischen Daumen und Zeigefinger des Experimentators. Die eigentliche Hubkraft, die dem Gewicht des Magneten entgegenwirkt, erzeugt ein starker supraleitender Magnet, der sich ein Stockwerk höher befindet. Allerdings wäre damit noch kein stabiler Schwebezustand zu erreichen. Erst der schwache Diamagnetismus, den die Finger des Experimentators aufweisen, sorgt für eine geringe abstoßende Kraft, die ein stabiles Schweben ermöglicht.

nur magnetisch, solange sie sich in einem äußeren Magnetfeld befinden. Sie werden von Permanentmagneten angezogen und eignen sich deshalb nicht für einen Gegenstand, den wir stabil schweben lassen wollen. Das geht nur mit diamagnetischen Substanzen; denn diese zeichnen sich dadurch aus, dass sie Dauermagneten abstoßen.

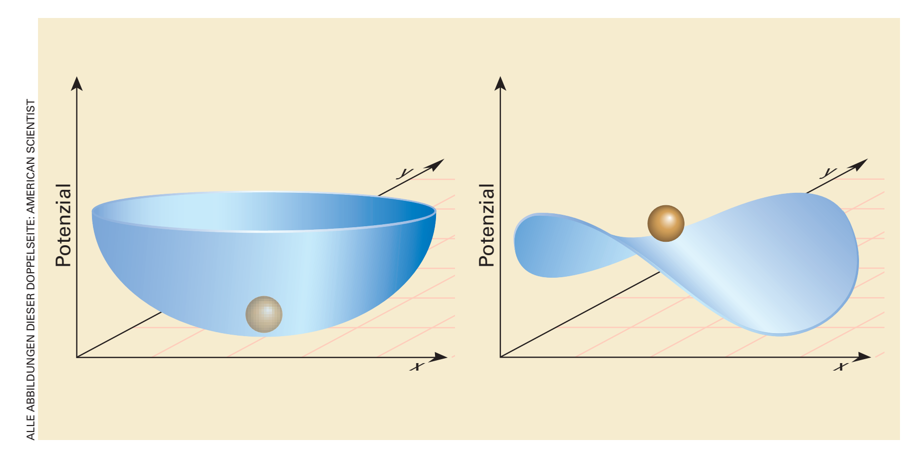
Frösche schweben, weil sie diamagnetisch sind

Das seltsame Verhalten diamagnetischer Materialien lässt sich mit Hilfe eines stark vereinfachten Atommodells verstehen. Betrachten wir ein Elektron, das den Kern eines Atoms in einer solchen Substanz umkreist (siehe Kasten auf S. 41). Wie jede bewegte elektrische Ladung erzeugt auch dieses Hüllenelektron ein Magnetfeld: Es wirkt wie eine winzige Leiterschleife. Die Elektronen, die andere Atome in dem diamagnetischen Material umkreisen, erzeugen ebenfalls Magnetfelder; da diese aber alle zufällig ausgerichtet sind, löschen sie sich gegenseitig aus. Von außen betrachtet ist die Substanz also nicht magnetisch.

Bringen wir aber den diamagnetischen Körper in ein äußeres Magnetfeld – etwa indem wir einen Permanentmagneten heranführen –, dann beschleunigen oder verlangsamen die Hüllenelektronen ihre Bewegung, um so der Änderung des Magnetfelds innerhalb ihrer Umlaufbahn entgegenzuwirken. (Das ist die atomare Version der so genannten Lenz'schen Regel, derzufolge bei der elektromagnetischen Induktion der induzierte Strom immer so gerichtet ist, dass das von ihm ausgehende magnetische Feld der Induktionsursache entgegenwirkt.) Als Nettoeffekt ergibt sich eine induzierte Magnetisierung, die dem äußeren Feld entgegenwirkt und so eine abstoßende Kraft hervorruft.

Diese Kraft lässt sich nutzen, um Permanentmagnete über diamagnetischen Materialien schweben zu lassen – oder umgekehrt. Der deutsche Physiker Werner Braunbeck führte 1939 erstmals eine solche diamagnetische Levitation vor. Dabei ließ er Körper aus den hoch diamagnetischen Materialien Wismut und Graphit über einem Elektromagneten schweben. In den letzten Jahren gehört es auf Physikausstellungen fast schon zum Standardrepertoire, Permanentmagneten über Supraleitern schweben zu lassen. Auch dies ist ein Beispiel für diamagnetische Levitation: Supraleiter sind nicht nur perfekte Stromleiter, sondern auch ideale diamagnetische Substanzen.

Warum nun verletzt diese Form des Schwebens nicht Earnshaws Theorem? Dessen Aussagen gelten nur für statische Felder – bei der diamagnetischen Levitation ist aber das Magnetfeld nicht zeitlich konstant, sondern ändert sich durch die Bewegung des schwebenden Körpers. Drücken wir beispielsweise einen schwebenden Magneten nach unten, so induziert er ein stärkeres abstoßendes Feld in dem unter ihm befindlichen diamagnetischen Material, das ihn wieder nach oben drückt. Steigt der Magnet umge- ▷



Ein magnetisch erzeugter Schwebezustand ist nur dann stabil, wenn sich das System in einem lokalen Minimum der potenziellen Energie befindet – verdeutlicht durch eine Kugel, die am Boden einer Mulde liegen bleibt (ganz links). In einem statischen Magnetfeld gibt es jedoch kein solches Minimum. Das Beste, was sich erreichen lässt, ist ein sattelförmiger Verlauf des Potenzials (links); die geringste Störung wird die Kugel aus ihrer instabilen Gleichgewichtslage stoßen.

kehrt durch eine Störung ein wenig nach oben, so verringert sich das ihn stützende Feld und er sinkt wieder nach unten. Das diamagnetische Material reagiert also automatisch so wie ein aktives Rückkopplungssystem mit seinen Sensoren und seiner elektronischen Steuerung.

Nun könnte man annehmen, dass diamagnetische Werkstoffe, die solch erstaunliche Eigenschaften zeigen, exotisch und schwer herzustellen seien. Doch weit gefehlt: Diamagnetische Materialien finden sich überall.

Tatsächlich sind eigentlich alle Materialien diamagnetisch. Nur wird in ferromagnetischen und paramagnetischen Stoffen diese Eigenschaft von stärkeren Effekten überlagert. Wasser, die meisten Kunststoffe und Gläser, viele keramischen Stoffe und Metalle – sie alle sind diamagnetisch. Den höchsten bekannten Diamagnetismus bei Raumtemperatur zeigt eine spezielle Form von Kohlenstoff, pyrolytischer Graphit. In diesem schichtweise hergestellten Werkstoff bewegen sich einige der Hüllenelektronen effektiv auf größeren Umlaufbahnen, was ein stärkeres magnetisches Feld zur Folge hat.

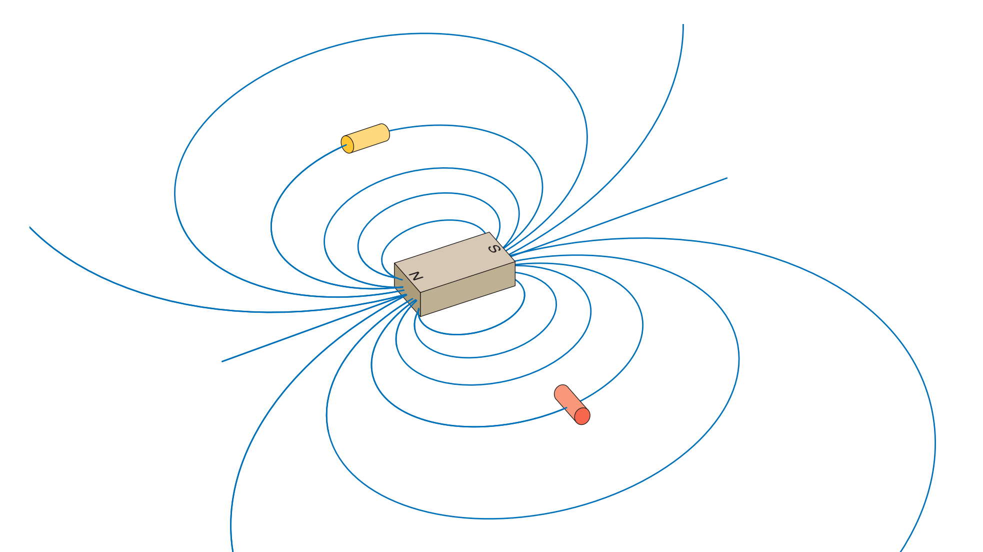
Wenngleich stark diamagnetische Stoffe am leichtesten in die Schwebe zu bringen sind, ist das im Prinzip mit allen diamagnetischen Materialien möglich, – das verwendete magnetische Feld muss nur stark genug sein. Dem Physiker Andre Geim, nun an der Universität Manchester (England), gelangen 1997 am Hochfeldmagnetlabor in Nijmwegen (Holland) einige spektakuläre Vorführungen. Unter anderem ließ er Haselnüsse und sogar einen lebenden Frosch schwerelos in einem Magnetfeld schweben.

Eine Frage der Balance

Vom Aufbau einer Vorrichtung hängt es ab, ob ein diamagnetischer Körper wirklich stabil in der Schwebe gehalten werden kann. Richtet man zum Beispiel zwei gleiche magnetische Pole gegeneinander aus, so heben sich die magnetischen Kräfte genau in ihrer Mitte auf. Platziert man ein Stückchen diamagnetischen Materials genau an dieser Stelle, so ist seine magnetische Energie gleich null. Jede Abweichung von dieser Position lässt die magnetische Energie anwachsen, sodass es sich wirklich um ein stabiles Gleichgewicht handelt. Doch so einfach dieses Prinzip klingt – in der Praxis sind erhebliche Schwierigkeiten zu überwinden.

Mit komplizierteren Feldgeometrien lassen sich auch anisotrope diamagnetische Materialien zum Schweben bringen – also solche Substanzen, deren Diamagnetismus von der Richtung des angewendeten Felds abhängt. Eine waagrecht liegende Platte aus pyrolytischem Graphit zum Beispiel wird von vertikalen Feldern stark abgestoßen, von Feldern in der horizontalen Ebene jedoch kaum beeinflusst. Noch aufwändiger wird es, wenn man einen schweren Körper wie einen Permanentmagneten schweben lassen will. Mir gelang das 1992 als Erstem, und zwar mit Hilfe eines Ensembles von kleinen Magneten, durch das ich die Feldstärke pro Masseneinheit erhöhen konnte.

Auch ein einzelner, fest installierter Magnet kann den nötigen Hub erzeugen, um einen anderen Magneten schweben zu lassen. Allerdings neigt diese Konstruktion gemäß Earnshaws Theorem dazu, instabil zu werden. Doch schon seit langem ist bekannt, dass stark diamagnetische Materialien wie Wismut oder Graphit die Levitation stabilisieren, wenn sie nahe dem schwebenden Magneten platziert sind. Balanciert man die Anordnung sorgfältig aus, so genügen dafür bereits schwach diamagnetische



Die Bezeichnungen diamagnetisch und paramagnetisch sind vom Verhalten unterschiedlicher Substanzen in einem Magnetfeld abgeleitet. Ein Stäbchen aus paramagnetischem Material (gelb), das sich frei drehen kann, richtet sich parallel zum umgebenden Feld aus, während ein anderes aus diamagnetischem Material (rot) sich senkrecht zum Feld ausrichtet.

Materialien wie Kunststoffe oder Silizium. Geim und seinen Koautoren gelang es sogar unlängst, einen Permanentmagneten unterhalb eines starken supraleitenden Magneten stabil schweben zu lassen, indem sie ihre Finger zu Hilfe nahmen: Menschliches Gewebe ist wegen seines Wassergehalts schwach diamagnetisch, sodass Daumen und Zeigefinger ausreichen, in vertikaler Richtung ein stabiles Gleichgewicht zu gewährleisten (siehe Bild auf S. 39).

Angefangen von solch einfachen Anordnungen reicht das Spektrum möglicher Versuchsaufbauten bis hin zu ausgefeilten Designs, bei denen Computermodelle eingesetzt werden, um die Stabilität gegen äußere Störungen wie Vibrationen und Stöße zu berechnen. Ingenieure wie ich versuchen solche Einflüsse in den Griff zu bekommen, damit sich nicht durch Resonanzen unerwünschte Schwingungen aufschaukeln, die den Schwebezustand schließlich zerstören würden.

Da das schwebende Objekt die übrigen Teile der Anordnung nicht berührt, lassen sich keine der üblichen Dämpfungstechniken wie etwa Stoßdämpfer einsetzen. Glücklicherweise liefern uns die starken Magnetfelder selbst eine Lösung für dieses Problem: die so genannte Wirbelstromdämpfung, die beispielsweise auftritt, wenn sich ein Permanentmagnet in der Nähe eines elektrischen Leiters bewegt. Die sich ändernden Magnetfelder induzieren einen Strom in dem Leiter, der sich dadurch erhitzt. Der Prozess dämpft also unerwünschte Bewegungen, indem er Bewegungsenergie in Wärme umwandelt.

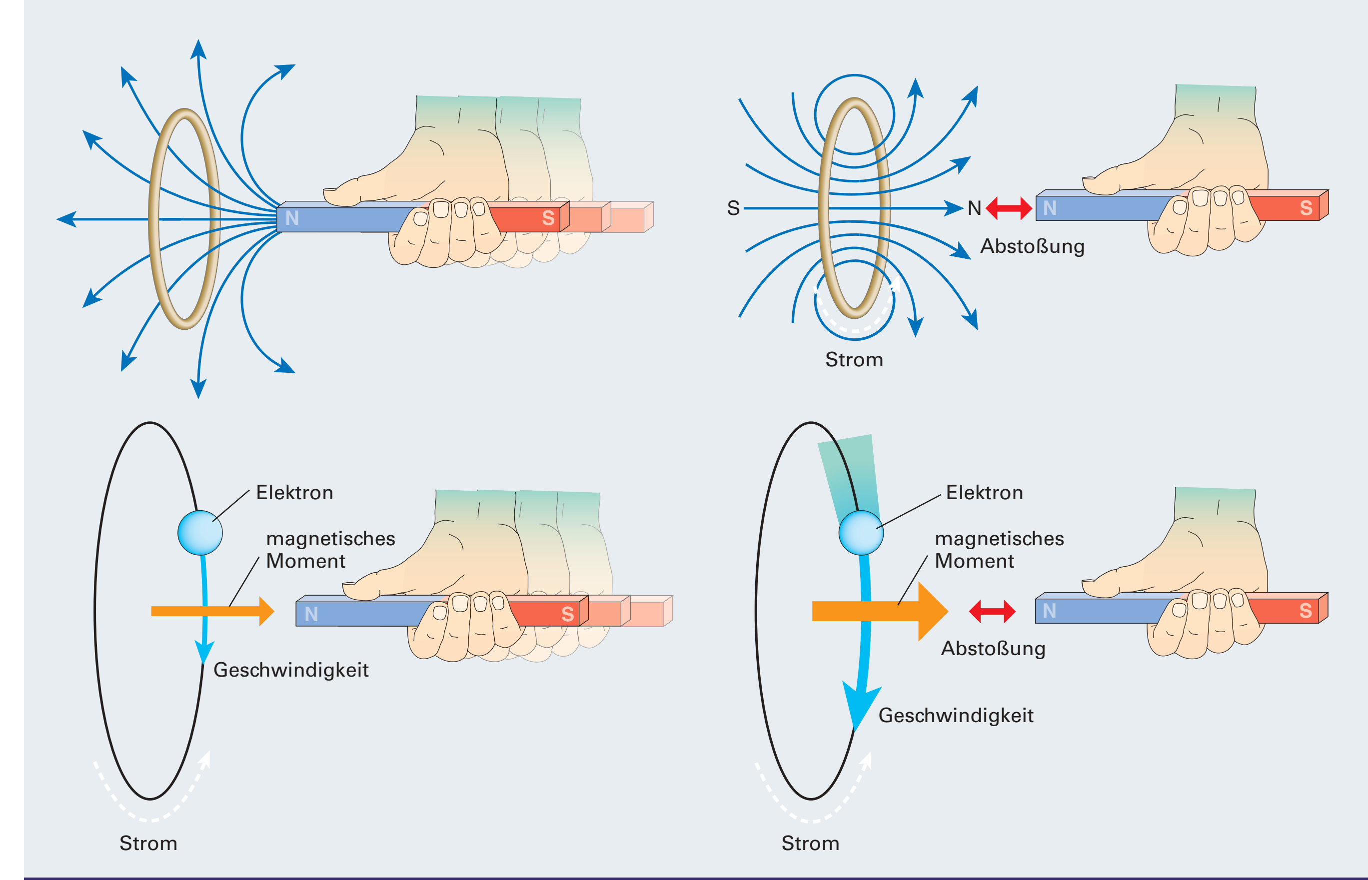
Solange keine absichtliche Störung erfolgt, bleibt die Bewegung des schwebenden Objekts für lange Zeit erhalten. Das ist in einigen Fällen eine überaus wünschenswerte Eigenschaft, zum Beispiel bei einem Schwungrad. Bereits 1966 zeigte Robert D. Waldron, damals für die Garret Corporation in Phoenix tätig, was möglich ist: Er brachte einen vier Zentimeter großen Graphitring zum Schweben und ließ ihn mit 100 Umdrehungen pro Minute im Vakuum rotieren. Die Reibungsverluste betrugen weniger als vier Nanowatt.

Die Magie der Levitation

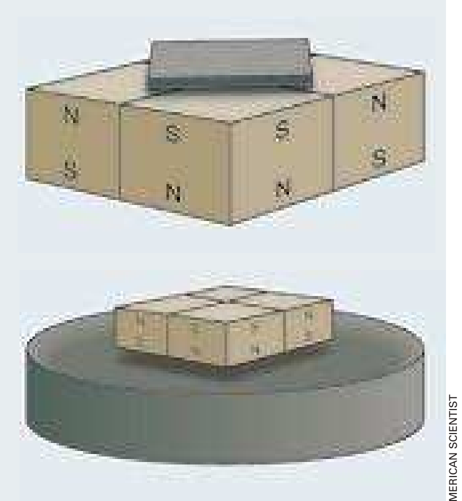
Und sogar diese geringen Verluste ließen sich eventuell vermeiden. Ihre Ursache waren vermutlich parasitäre Wirbelströme in dem elektrisch leitenden Graphitring. Die Reibung ließe sich also drastisch reduzieren, wenn man den Ring aus einzelnen, voneinander isolierten Graphitteilchen herstellen würde – oder aus einem nichtleitenden diamagneti- ▷

Warum diamagnetische Materialien Magnete abstoßen

Diamagnetismus entsteht durch eine atomare Version der Lenz'schen Regel. Diese besagt, dass die Änderung des magnetischen Flusses durch eine Leiterschleife (oben links) einen elektrischen Strom induziert, der seinerseits ein Magnetfeld erzeugt, das der ursprünglichen Änderung entgegenwirkt (oben rechts). In einem diamagnetischen Material agiert ein den Atomkern umkreisendes Elektron sozusagen wie eine Mini-Leiterschleife: Es beschleunigt oder verlangsamt seine Bewegung und wirkt so Veränderungen des äußeren Magnetfelds entgegen (unten). Die in einem diamagnetischen Objekt induzierte Magnetisierung führt deshalb stets zu einer abstoßenden Kraft.



Eigenstabil schwebende Magneten



Das Schweben von pyrolytischem Graphit (grau) erfordert üblicherweise eine geeignete Anordnung von Neodym-Eisen-Magneten (braun), die seit den 1990er Jahren zur Verfügung stehen (oben und S. 44). Die Anordnung der Levitation umzukehren ist schwierig, weil die Neodym-Eisen-Legierung erheblich dichter ist als Graphit. Der Autor fand 1992 eine Lösung für das Problem: Er verwendete eine Komposition aus vier Neodym-Eisen-Magneten über einer schwach konkaven Basis aus Graphit. Dadurch werden die schwebenden Magneten an ihrer Position in der Mitte gehalten (unten).

▷ schen Material. Ein auf diese Weise optimierter Ring könnte in einem Vakuum für Monate oder gar Jahre rotieren.

Mittlerweile wird das eigenstabile freie Schweben mit Hilfe diamagnetischer Materialien seit über sechzig Jahren untersucht. Gleichwohl sind erstaunlich wenige Menschen mit dem verblüffenden Phänomen vertraut – das gilt selbst für viele Wissenschaftler und Ingenieure. Ein Grund dafür ist, dass der Effekt bislang nur spielerische, aber noch keine kommerzielle Anwendung gefunden hat. Dabei haben sich die Forscher in akademischen und industriellen Labors durchaus Gedanken über verschiedene Anwendungen gemacht.

Ein Hindernis für eine technische Realisierung war lange Zeit das Fehlen geeigneter Magnete. Die effizienten Neodym-Eisen-Magneten, mit denen die diamagnetische Levitation heute recht einfach zu bewerkstelligen ist, wurden erst in den 1980er Jahren entdeckt und sind erst seit den 1990er Jahren leicht erhältlich. Im Grunde hat der Physiker Werner Braunbeck die diamagnetische Levitation entdeckt, lange bevor die Zeit dafür reif war.

Ich machte mich Mitte der 1980er Jahre während meiner Doktorarbeit mit dem Phänomen vertraut. Damals entwickelte ich winzige robotische Manipulatoren. Könnte man sie in diesem kleinen Maßstab genauso präzise steuern wie ihre großen Vorbilder in der Fahrzeugproduktion, dann – so die damalige Idee – könnten sich Mikrofabriken realisieren lassen, deren Komplexität und Genauigkeit mit modernen Produktionseinrichtungen vergleichbar wäre. Beispielsweise wäre damit die Massenproduktion von kleinen Apparaturen möglich, um chemische Stoffe zu analysieren oder um Substanzen in großer Menge auf mögliche medizinisch wertvolle Reaktionen zu untersuchen.

Reibungs- und verschleißfreie Lager

Die Entwicklung eines solchen Systems ist natürlich mit zahlreichen technischen Hürden gespickt. Die Hauptschwierigkeit ist, einen zentimetergroßen Roboter autonom zu machen, denn er muss über eigene Energieversorgung, Steuereinrichtungen, Navigationssystem und so weiter verfügen. Ich erkannte bald, dass es sinnvoll ist, Energieversorgung und Steuerung nach außen zu verlegen und magnetische oder elektrische Kräfte von externen Vorrichtungen aus auf die robotischen Manipulatoren einwirken zu lassen. Trotzdem musste ich noch nach Lagern suchen, die eine Bewegung des Mikroroboters zuließen. Konventionelle Methoden versagen hier: Übereinander gleitende Flächen verursachen Probleme durch Reibung und Abnutzung; und winzige Räder sind schwierig herzustellen und zu montieren.

Levitation schien die ideale Lösung des Problems zu sein. Aber wie soll man tausend Mikroroboter gleichzeitig schweben lassen, die auch noch miteinander interagieren? Das Versagen nur eines einzigen Sensors oder Regelkreises würde sofort ein verheerendes Chaos auslösen. Ich begann daher, mich der diamagnetischen Levitation zuzuwenden, deren Eigenstabilität ein System von interagierenden Mikrorobotern möglich machen könnte.

Obwohl ich niemals eine Mikrofabrik gebaut habe, führte mich das Nachdenken über die winzigen Roboter dazu, mich mit dem grundlegenden Problem geeigneter Lager für Mikromaschinen auseinander zu setzen. Mikromotoren beispielsweise verfügen häufig über eine rotierende Achse, die sich wegen der Gleitreibung abnutzt und schwierig zu regeln ist. Einige Ingenieure haben versucht, aktive Levitation in solchen Motoren einzusetzen – mit unterschiedlichem Erfolg. Um die Effektivität diamagnetischer Lagerung zu untersuchen, habe ich vor einigen Jahren einen ein Millimeter großen Mikromotor gebaut, der aus einer sich selbst stabilisierenden schwebenden Anordnung von Magneten bestand, die elektromagnetisch angetrieben wurde. Der Motor brachte es in Luft auf 21 000 Umdrehungen pro Minute.

Solche Erfolge zeigen, dass sich mit der diamagnetischen Levitation vermutlich viele Probleme lösen lassen, die bei dem Lager einer Mikromaschine auftreten können. Mögliche Anwendungen gibt es reichlich. Zum Beispiel messen mechanische Kreisel Drehungen mittels einer beweglich gelagerten rotierenden oder schwingenden Masse. Ganz ähnlich nutzen Beschleunigungsmesser Testmassen, die mit einer Feder oder einem biegsamen Arm gelagert sind. Gravimeter benutzen eine an einer Feder befestigte Testmasse zur Messung der Schwerkraft; Neigungsmesser und Strömungsmessgeräte für Turbinen verwenden eine drehbar gelagerte Masse. In allen diesen Fällen ist die Lagerung der Testmasse kritisch für Empfindlichkeit und Genauigkeit, für den Messbereich, die Robustheit und die Kosten des Geräts.

Im Bereich hochpräziser wissenschaftlicher Sensoren hat die diamagnetische Levitation bereits ihren Wert bewiesen. So bauten Ivan Simon und seine Kollegen von dem Beratungsunternehmen Arthur D. Little in Cambridge (Massachusetts) einen Neigungsmesser mit einem schwebenden Graphitstab als Sensor. Das Gerät konnte Neigungswinkel von weniger als einem Mikroradian – also weniger als einem sechshunderttausendstel Grad – anzeigen. Die Gruppe meldete auch einen hochpräzisen Beschleunigungsmesser zum Patent an. Und W. M. Ponisowski von der Staatsuniversität Perm (Russland) baute Ma-

nometer, die noch Gasdrucke von 10^{-10} Torr nachweisen können, wie sie in Ultrahoch-Vakuumsystemen vorkommen. Als Sensoren dienen dabei rotierende Flügel, die diamagnetisch schweben. Meine Kollegen am SRI und ich haben mit ähnlich konstruierten Strömungsmessgeräten experimentiert, um die Reibungsprobleme konventioneller turbinenartiger Geräte zu vermeiden. Die Reibung in den Lagern führt auch zu einem beträchtlichen Widerstand bei hohen Strömungsgeschwindigkeiten und beschränkt so die Fähigkeit konventioneller Instrumente, hohe Strömungsraten zu messen. Diamagnetische Lager vermeiden beide Probleme und erlauben so einem Messgerät, über eine enorme Spanne von Strömungsraten genau zu arbeiten.

Hohe Messgenauigkeit von Sensoren

Obwohl diese Geräte höchst unterschiedliche Größen messen, nutzen sie alle die Fähigkeit der Levitation, eine Lagerung mit sehr geringer Steifheit in einer Richtung (oder um eine Achse) zu ermöglichen. Dadurch erreichen sie ihre hohe Messgenauigkeit. Die geringe Steifigkeit erlaubt es den Testmassen, bereits auf sehr kleine Kräfte und Drehmomente zu reagieren. In herkömmlichen Sensoren dienen so genannte Flexures – mechanische Elemente, die sich unter Krafteinfluss verbiegen oder verdrillen – der Lagerung von Testmassen. Diese Elemente werden oft mit den gleichen Methoden hergestellt, wie sie bei der Massenproduktion von Mikrochips eingesetzt werden. Solche Mikroflexures arbeiten bei Frequenzen oberhalb von 100 Hertz sehr effektiv.

Niedrigere Frequenzen erfordern eine geringere Steifigkeit und sind deshalb schwieriger herzustellen; zudem sind sie oft schwach und bruchanfällig. Im Gegensatz dazu sind selbst extrem kleine diamagnetische Lager mit geringer Steifigkeit außergewöhnlich unempfindlich gegen Stöße, da sie keine leicht zerbrechlichen Teile enthalten. Wir können deshalb erwarten, dass die diamagnetische Levitation schon bald ihre kommerzielle Anwendung in einer neuen Klasse von hochpräzisen und doch unter rauen Bedingungen einsetzbaren Mikrosensoren findet.

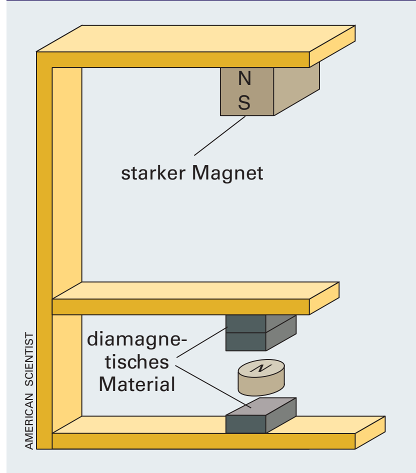
Es gibt natürlich auch Sensoren, deren Empfindlichkeit nicht von einer geringen Steifigkeit und niedrigen Resonanzfrequenzen abhängt. So nutzen einige Konstruktionen Testmassen, die mit hoher Resonanzfrequenz vibrieren. Der Sensor reagiert auf seinen spezifischen Stimulus (sei es eine Beschleunigung, Anziehungskraft, Rotation oder etwas anderes) mit einer Änderung der Resonanzfrequenz. In diesen Geräten darf die Vibration praktisch nicht gedämpft werden, damit die Resonanzfrequenz scharf definiert ist und sich mit hoher Genauigkeit messen lässt. Auch hier könnte die diamagnetische Levitation Vorteile bieten, da sie erlaubt, die Dämpfungsverluste zu vermeiden, die in konventionellen Lagern und festen Flexures auftreten.

Wieder andere Sensoren basieren auf der Isolierung einer Testmasse, sei es die thermische Isolierung in einem Bolometer (Strahlungsmesser) oder die mechanische Isolierung gegen unerwünschte Vibrationen. Auch für diese Art von Sensoren bietet sich der Einsatz der diamagnetischen Levitation an, da sich mit ihr Massen ohne physischen Kontakt lagern lassen.

Schon bevor sie in kommerziellen Sensoren eingesetzt wird, könnte diamagnetische Levitation eine Anwendung in industriellen Reinräumen finden. Der Vorteil diamagnetischer Lager in diesem Bereich ist es, dass sie keinen Abrieb aufweisen und kein Schmiermittel benötigen – und deshalb keine frei umherschwebenden Partikel erzeugen, die empfindliche Prozesse stören könnten wie zum Beispiel die Produktion elektronischer Bauteile oder pharmazeutischer Produkte.

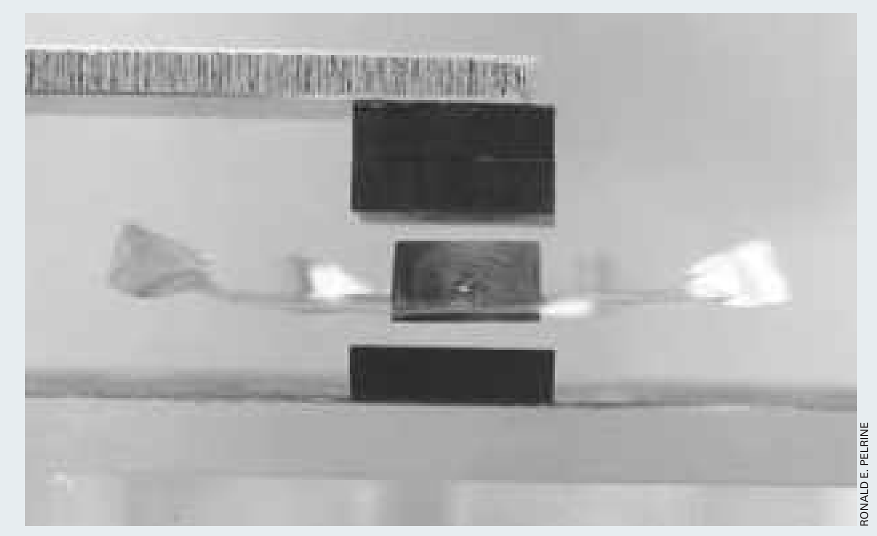
Gegenwärtig werden in Reinräumen Gasdrucklager und magnetische Lager mit aktiver Rückkopplung eingesetzt, doch diese Systeme haben eine Reihe von Nachteilen. Versagt bei einem aktiv geregelten Levitationssystem ein Sensor oder fällt die Stromversorgung aus, kann die bewegliche Plattform auf ihre Führungsschienen stürzen und dabei Partikel ▷

Reibungsfreier Rotor



Um einen schweren Körper schweben zu lassen, braucht es zunächst einen starken Magneten, der ihn gegen die Schwerkraft anhebt. Diamagnetische Materialien ober- und unterhalb des Körpers sind nötig, um den Schwebezustand zu stabilisieren (links).

Mit einer solchen Konstruktion realisierten der Autor und seine Kollegen den Prototyp eines Strömungsmessgeräts, indem sie Flügel an dem schwebenden Magneten anbrachten (Foto unten). Solche magnetisch gelagerten Rotoren drehen sich reibungsfrei.



RONALD E. PELRINE



RONALD E. PELRINE

Unterschiedlich geformte Teile aus pyrolytischem Graphit – bei diesem Experiment insgesamt rund 120 Stück – schweben auf faszinierende Weise über einer Unterlage aus Permanentmagneten. Eine Apparatur, die über einen Regelkreis eine vergleichbare Anzahl unterschiedlicher Gegenstände stabil schweben lassen könnte, wäre eine große technische Herausforderung. Dieses passive System diamagnetischer Levitation ist hingegen äußerst einfach aufzubauen.

▷ freisetzen, welche die Anlage kontaminieren. Und Gasdrucklager können natürlich nicht bei Prozessen eingesetzt werden, die ein Vakuum erfordern. Die diamagnetische Levitation löst all diese Probleme.

Vor mehreren Jahren baute ich mit meinen Kollegen am SRI im Auftrag eines Kunden den Prototyp eines Systems, das unter Reinraumbedingungen im Vakuum eingesetzt wird. Die schwebende Struktur, die sowohl Permanentmagneten zum Anheben als auch diamagnetisches Material zur Stabilisierung enthält, trägt eine Palette mit vielen Metallscheiben, auf die eine spezielle Beschichtung aufgetragen werden soll. Die schwebende Masse ist etwa einen Meter lang und hoch sowie zehn Zentimeter breit. Mit einem Gewicht von etwa 13 Kilogramm – abhängig von der Anzahl der Scheiben – ist sie die größte Masse, die jemals per diamagnetischer Levitation (ohne den Einsatz von Supraleitung) angehoben wurde.

Alternative zu Weltraummissionen

Diamagnetische Levitation lässt sich auch noch für andere spezielle Anwendungen einsetzen – zum Beispiel, um den Einfluss der Schwerelosigkeit auf lebende Organismen, Werkstoffe und Apparaturen zu untersuchen. Solche Anwendungen erfordern zumeist den Einsatz sehr starker Felder, die von supraleitenden Magneten erzeugt werden. Obwohl eine solche Ausrüstung teuer ist, sind diese Kosten doch viel geringer als für eine echte Weltraummission.

Solange das schwebende Objekt nur klein genug ist, lassen sich solche Experimente auch ohne supraleitende Magnete ausführen. Nach meiner Schätzung müssten moderne Permanentmagneten in der Lage sein, Wassertropfen bis zu einer Größe von 160 Mikrometern schweben lassen zu können. Solche Levitationen im kleinen Maßstab stellen zwar eine technische Herausforderung dar, aber sie sind nicht utopisch und können kostengünstig permanente Schwerelosigkeit (oder zumindest Mikrogravitation) erreichen, ohne tatsächlich in die Erdumlaufbahn fliegen zu müssen.

Diamagnetische Kräfte könnten sich auch in der Raumfahrt als sehr nützlich erweisen. In der Schwerelosigkeit des Alls wären größere Abstände zwischen dem schwebenden Gegenstand und dem Rest der Apparatur möglich. So ließen sich beispielsweise empfindliche Experimente von störenden Vibrationen isolieren oder die Dralläder lagern, die in Raumfahrzeugen zur Stabilisierung eingesetzt werden. Diamagnetische Kräfte könnten es Astronauten auch ermöglichen, Objekte zu handhaben, ohne sie körperlich zu berühren.

Im Weltall ließe sich sogar der Hauptnachteil der diamagnetischen Levitation überwinden: Der bislang erreichbare Lagerdruck ist zu niedrig für die meisten mechanischen Anwendungen. Allerdings gibt es keinen fundamentalen Grund, der gegen spezielle, maßgeschneiderte Materialien spräche, deren Diamagnetismus die heute erreichbaren Werte um das Zehn- oder gar Hundertfache übertreffen würden. Wenn sich solche Werkstoffe finden und entwickeln ließen, würde das bislang wenig bekannte Kuriosum der diamagnetischen Levitation sofort zu einer bedeutenden Technologie werden. Verkehrsingenieure zum Beispiel könnten mit dieser Technik neue Magnetschwebebahnen entwickeln.

Aber in dem Maße, in dem sich Magnete, Werkstoffe und Verfahren schrittweise verbessern lassen, findet die Schwebetechnik mittels diamagnetischer Materialien sicherlich auch ohne einen solchen technologischen Durchbruch immer neue praktische Anwendungen. Und immerhin ist die diamagnetische Levitation als faszinierendes physikalisches Phänomen weiterhin Thema der Grundlagenforschung. Ich bin überzeugt davon, dass die künftige Arbeit auf diesem Gebiet weitere faszinierende Überraschungen bereithält. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE

Ronald E. Pelrine studierte Physik am Massachusetts Institute of Technology und an der Universität von Washington in Seattle. Nach seiner Promotion 1989 im Fach Maschinenbau an der Universität von Texas in Austin ging er zur Firma SRI International, wo er jetzt als leitender Forschungsingenieur tätig ist.

Abgehoben. Schweben in elektromagnetischen Feldern. Von Felix Voigt und Klaus Hinsch in: Physik in unserer Zeit, Bd. 34, Heft 5, S. 232 (2003)

Freely suspended bodies in electric and magnetic fields. Von Werner Braunbeck in: Zeitschrift für Physik, Bd. 112, S. 753 (1939)

On the nature of the molecular forces which regulate the constitution of the luminiferous ether. Von Samuel Earnshaw in: Transactions of the Cambridge Philosophical Society, Bd. 7, S. 97 (1842)

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

CARVING-SKI

Kraft sparendes Kurven

Mit Taille und Piezokeramik fahren sich Carver noch einfacher.

Von Mark Fischetti und Bernhard Gerl

Mitte der 1990er Jahre ging ein Ruck durch die Ski-Welt. Hatten die begehrten Bretter bis dahin eine fast rechteckige Form, waren sie nun in der Mitte tailliert, also vorne und hinten breiter und zudem deutlich kürzer als ihre Vorgänger. Elegant mit geschlossenen Beinen abwärts zu wedeln war mit »Carvern« zwar nicht möglich, und die breitbeinige Stellung hat manchen Spott hervorgerufen, doch der ist inzwischen verstummt. Denn Carver fahren die Kurven fast von selbst: Kippt der Fahrer die Ski, biegen sie sich so weit durch, dass die Kanten auf ganzer Länge in den Schnee drücken. Weil Innen- und Außenkanten aber in der Mitte enger zusammenliegen als hinten und vorne, ergibt sich eine Bogenform. Diesen Bogen fährt der Ski nach, Kraft benötigt der Fahrer erst dann, wenn er einen engeren Radius anstrebt: Dazu muss er die Bretter stärker durchbiegen.

Die Sache hat aber einen kleinen Haken. Der Carver wird durch hohe Drehimpulse stärker belastet als ein konventioneller Ski und muss deshalb stabiler gebaut sein. Trotzdem darf er nicht zu schwer und erst recht nicht zu steif werden – ein steifer Ski vibriert leichter, kann dann abheben und wegrutschen. Aus diesem Grund bestehen Ski aus mehreren Schichten. In der Mitte sorgt ein Kern für Festigkeit – hier spielt Holz immer noch eine große Rolle, weil seine Eigenschaften weit gehend temperaturunabhängig sind und es elastisch, stabil und leicht ist. Diesen Kern unterstützen verwebte Glasfasern, Kohlenstoff oder sogar Aluminiumelemente, die überdies Schwingungen dämpfen. Die Laufflächen bestehen aus Polyethylen, die Kanten aus rostfreiem Kohlenstoffstahl, die Deckschicht aus widerstandsfähigen und einfärbbaren Kunststoffen wie ABS, Polyamid oder Glasfaserlaminaten.

Der Hersteller Head im österreichischen Kennelbach hat Ski sogar mit piezoelektrischen Fasern versehen. Werden die durch am Ski angreifende Kräfte auseinander gezogen oder verbogen, erzeugen sie elektrischen Strom, den ein Chip verarbeitet. Er sendet dann Steuerströme in die Fasern zurück, woraufhin sie sich nun umgekehrt ausdehnen oder zusammenziehen und so einer Verwindung des Skis und dem damit verbundenen Drehimpuls entgegenwirken. Allerdings schlägt das Hightech mit einem Aufpreis von etwa 50 Prozent zu Buche, der sich nach Ansicht vieler Tester für Freizeitfahrer nicht lohnt, denn die Unterstützung beim Steuern macht sich erst bei hohen Geschwindigkeiten auf eisigen Pisten bemerkbar.

Auch an der Taillierung wird weiter gearbeitet. Der amerikanische Hersteller K2 wird in diesem Monat einen Ski vorstellen, der vorne und hinten einen anderen Radius hat als in der Mitte, wie es bei Snowboards üblich ist. Dadurch lassen sich unterschiedliche Kurvenradien leichter fahren. So fehlen letztlich zum komfortablen Wintergenuss nur noch zwei Dinge: Schnee und Sonne. ◁

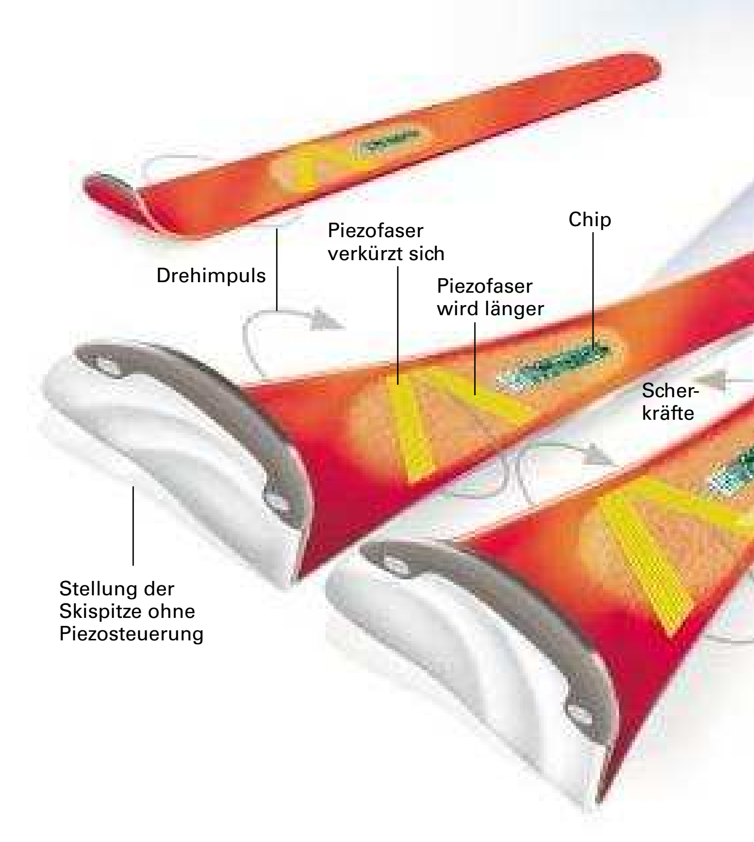
Mark Fischetti ist Redakteur bei Scientific American, **Bernhard Gerl** freier Fachjournalist in Regensburg.



HEAD SPORT AG

▲ Das Grundprinzip des Carving-Skis: Sobald der Fahrer ihn kippt, biegt sich der Ski so weit durch, dass die Kante auf ganzer Länge in den Schnee greift. Weil sie durch die Taillierung bereits eine Bogenform hat, fährt der Ski ohne weiteres Zutun des Fahrers eine Kurve.

▼ Fährt der Skiläufer einen Bogen, drückt sein Gewicht den Ski etwa in der Mitte durch. Der Schnee wiederum erzeugt eine Gegenkraft, die entlang der Innenkante nach oben wirkt. So entsteht in der obersten Schicht des Sportgeräts ein Drehimpuls, der die Kante vom Schnee abheben kann. Weil sich dieser Drehimpuls während der Bogenfahrt ständig ändert, entstehen Vibrationen, die der Fahrer als Flattern des Skis spürt.



WUSSTEN SIE SCHON?

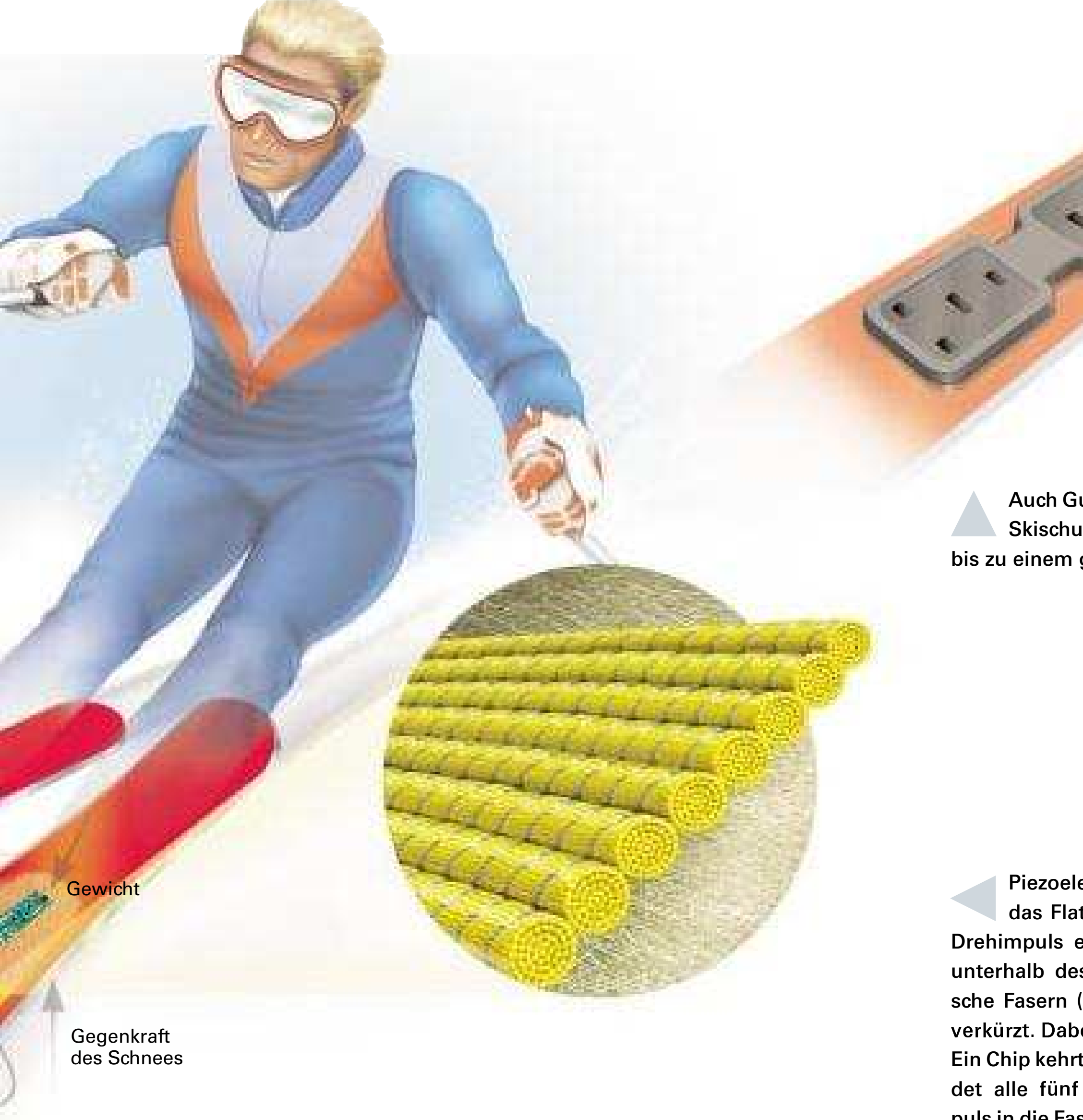
Die Bezeichnung Ski stammt aus Norwegen und meint ein langes gespaltenes Holzstück. Schon vor etwa 4000 Jahren haben die Bewohner der norwegischen Insel Rødøy das Bild eines Skifahrers in einen Stein gemeißelt. Der älteste Ski selbst wurde in einem Moor bei Hoting in Schweden gefunden. Dieses 110 mal zehn Zentimeter lange Brett ist etwa 4500 Jahre alt.

Für optimales Sportvergnügen sorgt auch das richtige Skiwachs. Beim Gleiten auf nassem Schnee bremst die Kapillarkraft des Wasserfilms zwischen Schnee und Ski, ein Wasser abweisendes Wachs verhindert diesen Effekt. Bei trockenem und körnigem Schnee können die Schneekristalle durch Reibung Fahrt herausnehmen. Ein entsprechendes hartes Wachs bringt in diesem Fall Abhilfe.

Carving-Ski sollen dem Fahrer etwa bis Schulter- oder Kinnhöhe reichen und damit zirka zwanzig Zentimeter kürzer sein als herkömmliche Alpinski. Die noch knapperen Fun-Carver erlauben einen Fahrstil, der dem Snowboarden ähnelt. Sie werden dementsprechend auch ohne Stöcke genutzt. Race-Carver wurden aus dem Rennlauf entwickelt. Sie sind mit etwa 180 Zentimetern länger als die normalen Carver und verfügen über zusätzliche Dämpfungsplatten. Deshalb können sie bei hohem Tempo gefahren werden.

Da jeder Carving-Ski auf einen festen Kurvenradius ausgelegt ist, kann es passieren, dass er eine engere Kurve fährt als vom Fahrer gewünscht. Das geschieht vor allem dann, wenn der seinen Ski zu schnell und heftig auf die Kante stellt. Ein Sturz ist bei einem solchen Verschneiden kaum abzuwenden.

KENT SNODGRASS / PRECISION GRAPHICS; QUELLE: HEAD SPORT AG



Auch Gummiplatten zwischen Ski und Skischuhen dämpfen die Vibrationen bis zu einem gewissen Grad.

Piezoelektrische Materialien können das Flattern des Skis reduzieren. Der Drehimpuls erzeugt eine Scherkraft direkt unterhalb des Skistiefels, die piezoelektrische Fasern (links) auseinander zieht oder verkürzt. Dabei entsteht elektrischer Strom. Ein Chip kehrt dessen Richtung um und sendet alle fünf Millisekunden einen Steuerpuls in die Fasern zurück, damit diese kürzer oder länger werden und den Drehimpuls kompensieren.

Der Tag, an



dem die Erde brannte

Der Asteroideneinschlag, der die Dinosaurier vernichtete, setzte auch eine verheerende Welle von Flächenbränden in Gang. Fast alle Wälder der Erde gingen in Flammen auf.

ALFRED T. KAMAJIAN

Von David A. Kring und Daniel D. Durda

Die meisten Wissenschaftler glauben heute, dass der Einschlag eines Asteroiden oder Kometen die Ära der Dinosaurier abrupt beendete. Allerdings ist noch längst nicht in allen Details geklärt, wie die Saurier – zusammen mit unzähligen weiteren Arten – ausgelöscht wurden und wie die Ökosysteme sich anschließend zu regenerieren vermochten.

Die globale Katastrophe übertraf bei Weitem die üblichen Schläge, von denen das Leben sich immer wieder erholt hat. Der Asteroid oder Komet raste mit mehr als vierzigfacher Schallgeschwindigkeit durch die Lufthülle. Er war so groß, dass sein Ende noch über die Reiseflughöhe eines Verkehrsflugzeugs emporragte, als sein vorderer Teil den Boden traf.

Der Einschlag erzeugte eine Explosion, die der Sprengkraft von 100 Billionen Tonnen TNT entsprach. Kein Ereignis auf unserem Planeten hat in all den 65 Millionen Jahren, die seither vergangen sind, jemals wieder so viel Energie freigesetzt.

Die Spuren dieser Kollision liegen hunderte Meter tief unter dem tropischen Regenwald der Halbinsel Yukatan, den Maya-Ruinen von Mayapán, der Hafenstadt Progreso und den Gewässern des Golfs von Mexiko. Der Einschlagkrater, nach einer heutigen Maya-Siedlung Chicxulub benannt, misst ungefähr 180 Kilometer im Durchmesser; ihn umgibt eine fast doppelt so große kreisförmige Verwerfung, die offenbar entstand, als die Erdkruste unter dem Einschlag erbebte.

Die Heftigkeit dieses Vorgangs stellt selbst kühne Sciencefictionfantasien in den Schatten. Eine ganze Welt ging zu Grunde und machte einer neuen Platz. Doch neuesten Untersuchungen zufolge löschte der Einschlag nicht unmittelbar oder augenblicklich ganze Arten aus, sondern bewirkte zunächst eine Vielzahl schwerer und komplexer Umweltschäden. Erst dadurch breitete sich eine Welle der Verwüstung rund um den Erdball aus. Besondere Zerstörungen richteten riesige Flächenbrände an, die über ganze Kontinente hinwegfegten. Die Flammen vernichteten empfindliche Lebensräume, zerstörten die Basis der kontinentalen Nahrungskette und brachten die Photosynthese fast völlig zum Erliegen.

Spuren eines Flammenmeers

Den anschaulichen Beweis für das Massensterben liefern zahllose Gesteinsaufschlüsse, insbesondere im Westen der USA und in Südeuropa. Besonders ergiebig ist das Raton-Becken zwischen Colorado und New Mexico (siehe die Bilder auf S. 54/55). Zwischen Gesteinsschichten aus der Kreidezeit – der Dinosaurier-Ära – und dem nachfolgenden Tertiär liegt eine nur ein Zentimeter dicke Tonschicht, die mit seltenen Elementen durchsetzt ist.

Bei genauer Analyse dieser Schicht an verschiedenen Orten in aller Welt machten Wendy Wolbach von der DePaul-Universität in Chicago und ihre Kollegen 1985 eine erstaunliche Entdeckung. Sie fanden mikroskopisch kleine Rußteilchen – kugelförmige, oft in Trauben zusammenklebende Kohlenstoffpartikel, deren Zusammensetzung dem Rauch von Waldbränden entspricht. Weltweit beläuft sich die Rußmenge auf nahezu 70 Milliarden Tonnen. Dieses globale Relikt ist die Asche der kreidezeitlichen Welt.

Zunächst interessierte der Ruß die Forscher hauptsächlich als zusätzliches Indiz dafür, dass am Massensterben nicht Vulkanausbrüche schuld waren, sondern die plötzlichen und weiträumigen Folgen eines kosmischen Einschlags (siehe »Streit um das Ende der Dinosaurier« von Erwin Lausch, Spektrum der Wissenschaft 8/2004, S. 62).

Im Jahre 1990 beschrieb der Planetenforscher H. Jay Melosh von der Universität Arizona, wie ein Asteroid oder Komet einen Weltenbrand ausgelöst haben könnte. Beim Einschlag zerplatzte der Himmelskörper, verdampfte ein Stück der Erdkruste und erzeugte eine gigantische Trümmerwolke. Die Glutwolke stieg mit zunehmender Geschwindigkeit aus dem Krater auf und raste durch die Atmosphäre. Sie führte Quarzkristalle mit, die noch wenige Augenblicke zuvor zehn Kilometer unter der Erdoberfläche geruht hatten.

Die Wolke schwoll auf einen Durchmesser von 100 bis 200 Kilometern an, bahnte sich ihren Weg in den Weltraum und expandierte, bis sie schließlich die gesamte Erde umhüllte. Dann begann das Material unter dem Einfluss der Schwerkraft zurückzufallen und durchstieß die Atmosphäre mit fast der gleichen Energie, mit der es von Chicxulub aufgestiegen war. Bei Geschwindigkeiten von 7000 bis 40 000 Kilometern pro Stunde erhellten die Partikel den Himmel wie Billionen Meteore und erhitzten einen Großteil der Atmosphäre auf mehrere hundert Grad, bevor sie sich langsam am Boden absetzten und die heute auffindbare Schicht bildeten.

Nach Meloshs Berechnungen könnte der Glutregen einen Großteil der globalen Vegetation in Brand gesetzt haben. Doch da 1990 noch niemand Ort und Größe des Einschlags kannte, ließ sich das gesamte Ausmaß der Erwärmung oder die Verteilung der Brände nicht ermitteln. Zwar war in aller Welt Ruß gefunden worden, aber deshalb musste nicht überall Feuer ausgebrochen sein: Wind konnte den Ruß weiträumig verteilt haben.

Bald nachdem Melosh seine Resultate veröffentlicht hatte, entdeckte ein Team von sieben amerikanischen, kanadischen und mexikanischen Wissenschaftlern – darunter einer von uns (Kring) –, dass Chicxulub die Einschlagstelle war. Damit war für die meisten Forscher die Ursache des Sauriersterbens geklärt und sie konzentrieren sich seither auf die Details des Vorgangs. ▷

IN KÜRZE

- **Ein Asteroideneinschlag** am Ort des heutigen Chicxulub-Kraters gilt als wahrscheinliche Ursache für das Massensterben am Ende der Kreidezeit. Damals gingen die Dinosaurier und mehr als drei Viertel aller Tier- und Pflanzenarten zu Grunde.
- **Weltweite Flächenbrände** zählten zu den verheerendsten Umweltkatastrophen, die der Einschlag auslöste. Als durch die Luft rasende Trümmer die Atmosphäre extrem erhitzten, ging die Vegetation auf einem Großteil der Kontinente in Flammen auf. Für die Tiere gab es kein Entkommen. Ganze Ökosysteme brachen zusammen.
- Nicht alle Gebiete waren gleich stark betroffen. Vor allem weit **nördlich der Einschlagstelle überlebten viele Arten**. Von diesen Nischen aus eroberte das Leben den Planeten zurück.

Eine Welt geht zu Grunde, eine andere entsteht



In den Sümpfen und Flusslandschaften Nordamerikas gedieh gegen Ende der Kreidezeit ein Mischwald aus Nadelholz, immergrünen und laubabwerfenden Bäumen. Unter geschlossenen Walddecken oder offenem Baumbestand wuchsen Farne, Wasserpflanzen und Blüten tragendes Gebüsch.



Der Chicxulub-Asteroid traf ein Flachmeer und schleuderte sofort Gesteinstrümmer, geschmolzene Substanzen und Dampf hoch in die Atmosphäre. Das meiste verteilte sich auf nahe gelegene Kontinentalbereiche, doch viel Material stieg bis in den Weltraum empor.



Die Wolke aus Dampf und Schutt breitete sich über den ganzen Globus aus. Als das ausgeworfene Material zur Erde zurückstürzte, erglühte es wie Billionen Meteore. Dadurch wurde die Luft mancherorts um hunderte Grad aufgeheizt.



Nach den verheerenden Flächenbränden blieben nur wenige Baumskelette stehen. Der Ruß des Feuers und der Staub des Einschlags setzten sich sehr langsam. Dadurch herrschte am Boden monatelang Dämmerung oder sogar tiefe Nacht.



Nach dem Einschlag gab es eine weit geringere Artenvielfalt als zuvor. Als Erste erholten sich Farne und Algen. Die Pflanzen in Sümpfen und sumpfnahen Gebieten überstanden die Katastrophe besser als die Arten in anderen Ökosystemen. Besonders hart traf es die Nadelbäume.



ALLE BILDER: CHRIS BUTLER

Allmählich bedeckte Buschwerk die baumlose Landschaft. Windbestäubte Arten vermehrten sich leichter als solche, die dabei auf Insekten angewiesen waren. Schließlich wuchsen wieder Bäume, doch erst nach vielen Jahren bildeten sich erneut geschlossene Walddecken. Wie lange das dauerte, ist ungewiss.

▷ Im Jahr 2002 haben wir eine neue Analyse der Flächenbrände abgeschlossen. In Kenntnis der Einschlagstelle konnten wir die Flugbahnen und die Verteilung des aus dem Krater ausgeworfenen Materials rekonstruieren sowie die Ausdehnung der Brände abschätzen. Nach unseren Berechnungen gelangte ein Teil des Materials bis zur halben Mondentfernung, bevor es wieder zur Erde zurückstürzte.

Innerhalb von vier Tagen hatten fast alle Trümmer die Erde wieder erreicht. Kaum mehr als zehn Prozent entkamen der Erdanziehung gänzlich. Dieser Schutt wurde quer durch das gesamte Sonnensystem geschleudert und kollidierte möglicherweise mit anderen Planeten. Übrigens sind gelegentlich auch Stücke von Mars und Mond auf der Erde gelandet – allerdings auf Grund andersartiger Auswurfprozesse.

Als blauer Regen fiel

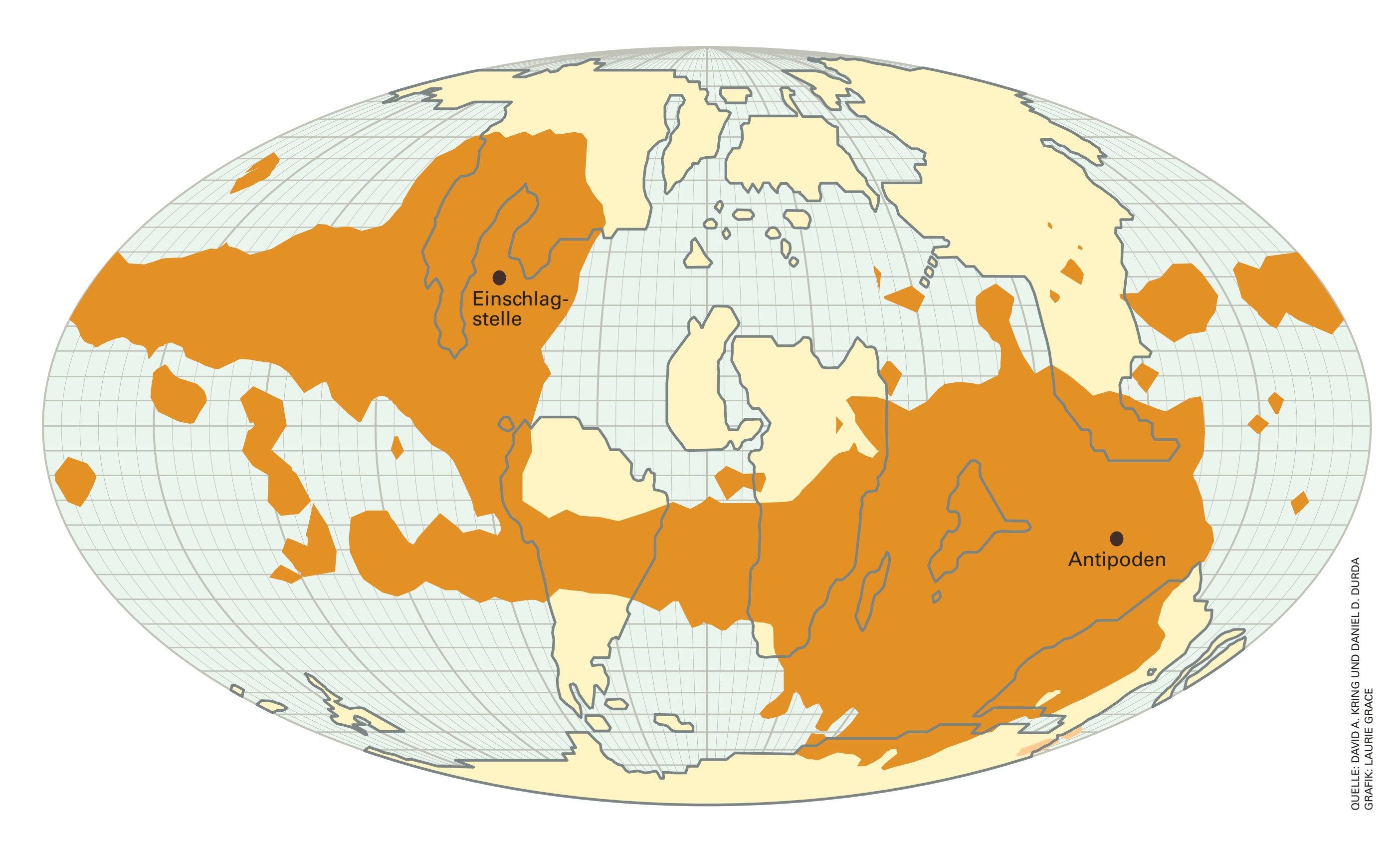
Beim Wiedereintritt heizte der kosmische Schutt die Atmosphäre so stark auf, dass an den unterschiedlichsten Orten Flächenbrände ausbrachen: im Süden und im Herzen Nordamerikas, in mittleren Breiten Südamerikas und Afrikas, auf dem indischen Subkontinent sowie in Südostasien. Zu bedenken ist, dass diese Landmassen auf Grund der Kontinentalverschiebung damals anders lagen als heutzutage. Je nach der Flugbahn des einschlagenden Objekts könnten noch andere Teile der genannten Kontinente in Flammen aufgegangen sein – und vielleicht obendrein Australien, die Antarktis und Europa.

Am schwersten betroffen war natürlich das Einschlaggebiet um Chicxulub selbst – aber ebenso sehr die davon am weitesten entfernte Stelle: Indien. Es lag vor 65 Millionen Jahren auf der entgegengesetzten Seite des Planeten und wurde dadurch zu einem Brennpunkt des Glutregens. In den folgenden Stunden und Tagen bewegte die Erdrotation die Landmassen ostwärts und setzte sie dem Hagel des Auswurfmaterials aus. Somit verlagerte sich die weltweite Welle von Flächenbränden westwärts, wobei sie langsam an Intensität verlor.

Dabei machte es wenig Unterschied, ob die Vegetation auf trockenem Grund wuchs oder in Sumpfland. Die Hitze dauerte so lange an, dass Feuchtpflanzen völlig austrockneten und dann brannten wie Zunder. Wurden die Tiere unruhig, als die Temperatur zu steigen begann? Gerieten sie in Panik, als der Himmel vom Schuttregen erglühte? Standen sie starr vor Schreck oder rannten sie davon – vielleicht zur nächsten Wasserstelle? In jedem Fall sanken die meisten Tiere betäubt zu Boden, als die Hitze unerträglich wurde, und spürten nichts mehr von dem Feuer, das rundum aus Büschen und Bäumen hervorbrach.

Die Flammen fraßen nicht nur die Wälder, sondern erzeugten auch extreme Luftverschmutzung. Der Ruß der Brände und der vom Einschlag aufgewirbelte Staub trübten den Himmel über dem gesamten Planeten. Das genaue Ausmaß der Verdunklung bleibt ungewiss, aber einigen Berechnungen zufolge wurde es am Boden so finster wie in einer lichtlosen Höhle.

Jedenfalls starben alle Pflanzen, die Photosynthese betrieben und darum auf Sonnenlicht angewiesen waren. Sogar im Meer und in Regionen, die nicht di-



▼ Damit Pflanzen austrocknen und in Brand geraten, müssen sie mindestens 20 Minuten lang mit 12 500 Watt pro Quadratmeter erhitzt werden. Diese Bedingungen wurden einerseits im Gebiet rund um Chicxulub erreicht, andererseits bei dessen Antipoden im heutigen Indien. Während die Erde unter einem Hagel von wieder in die Atmosphäre eintretendem Gesteinsschutt rotierte, fraßen sich von beiden Regionen breite Feuerstraßen westwärts.

Die Wälder der Kreidezeit

Gegen Ende der Kreidezeit – kurz vor dem Einschlag des Kometen oder Asteroiden vor 65 Millionen Jahren – herrschte wärmeres Klima als heute. Die Polarregionen waren nicht von Eiskappen bedeckt, und manche Dinosaurier wanderten nordwärts bis ins heutige Alaska und nach Süden bis zu den antarktischen Seymour-Inseln. Eine Meeresstraße durchtrennte Nordamerika und verband den Golf von Mexiko mit dem Nordmeer. Die Vielfalt der Ökosysteme reichte von Sümpfen bis zu Laubwäldern. In Nordamerika, wo die fossilführenden Sedimente gut erhalten sind, haben Paläobiologen diese Ökosysteme kartiert. Über die Vegetation der späten Kreidezeit in anderen Teilen der Welt ist wenig bekannt.

Wo heute das südliche Colorado und das nördliche New Mexico liegen, schlängelten sich Flüsse von den soeben entstehenden Rocky Mountains zu einer Küstenebene im Osten. Charles L. Pillmore und seine Kollegen vom U.S. Geological Survey haben verschiedene Sedimentgebiete kartiert – Flussbetten, Hochwasserablagerungen, Überschwemmungsebenen und Sümpfe. Anhand fossiler Blätter in diesen Sedimenten zeigten Jack Wolfe und Garland Upchurch, dass die Vegetation von randtropischen, großblättrigen, immergrünen Bäumen beherrscht wurde, die eine schüttere Walddecke bildeten.

Im Bereich des heutigen Nord- und Süd-Dakota fand Kirk R. Johnson vom Denver Museum of Nature and Science fossile Blätter, die auf ein Waldgebiet schließen lassen, das von bedecktsamigen Blütenpflanzen und kleinen bis mittelgroßen Bäumen beherrscht wurde. Weiter nördlich war es nach Meinung von Wolfe und Upchurch feuchter, weshalb dort ein immergrüner Wald mit großblättrigen Bäumen gedeihen konnte; dieser Wald war dichter, die Wipfel bildeten wahrscheinlich ein zusammenhängendes Dach. Manche Kletterpflanzen trugen große Blätter mit lang gezogenen Träufelspitzen, über die Wasser abfließen konnte.

Während in den heutigen USA Blütenpflanzen dominierten, waren im Westen Kanadas nach Arthur Sweet vom Geological Survey of Canada Nadelbäume und andere Zapfen tragende Pflanzen am häufigsten.



DENVER MUSEUM OF NATURE AND SCIENCE

▲ Der Wald der Kreidezeit war warm und feucht. In ihm gediehen großblättrige Bäume, tropische Pflanzen mit paddelförmigen Blättern sowie Kräuter und Farne.



DONNA BRAGINETZ

▲ Im Tertiär war die Artenvielfalt zunächst geringer. Der anfängliche Bewuchs mit Farnen und Kräutern wich Verwandten der heutigen Platanen, Walnussbäume und Palmen.

rekt von Bränden betroffen waren, brachen die Nahrungsketten zusammen. Diese Phase wird gelegentlich mit dem so genannten nuklearen Winter verglichen, der nach Modellrechnungen auf einen großen Krieg mit Kernwaffen folgen könnte (siehe »Die klimatischen Auswirkungen eines Nuklearkrieges« von Richard P. Turco et al., Spektrum der Wissenschaft 10/1984, S. 36).

Es dauerte Monate, bis der Schmutz durch Niederschläge ausgewaschen war. Wahrscheinlich fiel er als blauer Regen – ähnlich wie der bläuliche, aschereiche Regen, der heutzutage nach Vulkanausbrüchen auftritt.

Von heutigen Waldbränden ausgehend schätzen wir, dass die Feuersbrünste auch zehn Billionen Tonnen Kohlendioxid freisetzten, hundert Milliarden Tonnen Kohlenmonoxid und ebenso viel Methan – insgesamt eine Kohlenstoffmenge, deren Erzeugen durch Verbrennung fossiler Energieträger beim heutigen Stand der Technik 3000 Jahre dauern würde.

Szenario einer Umweltkatastrophe

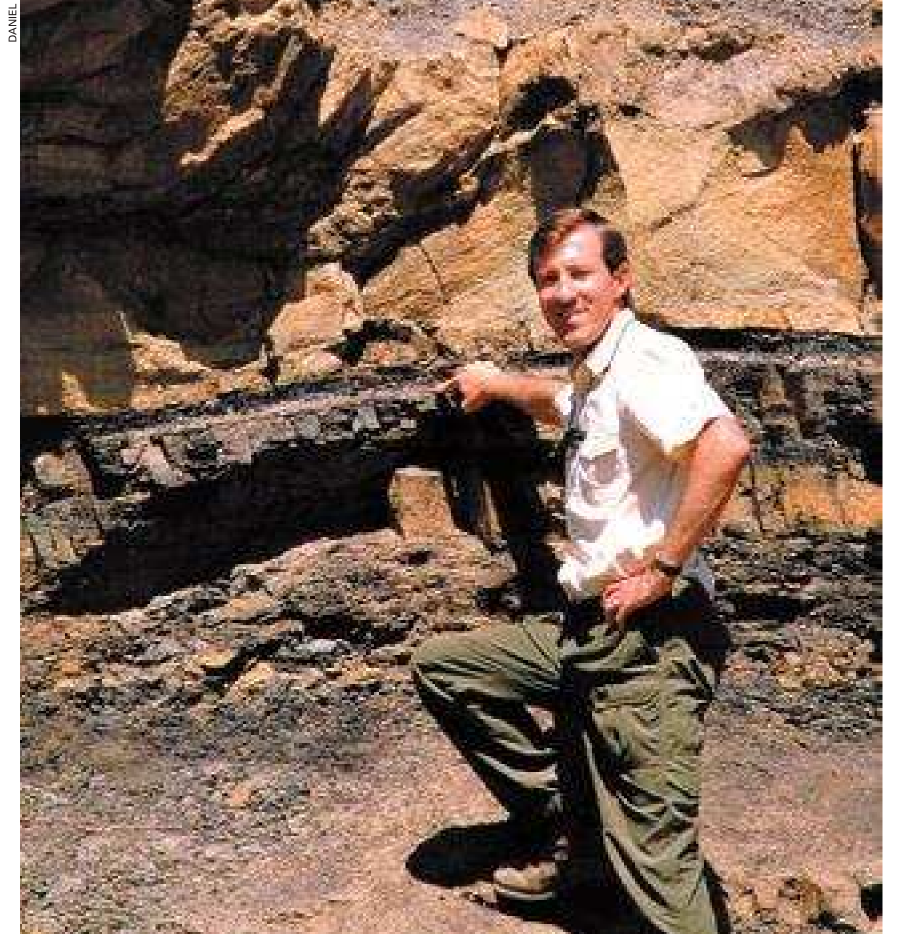
Daher folgte auf die dunklen, winterlichen Bedingungen eine Erwärmungsphase durch globalen Treibhauseffekt. Die Flammen produzierten zudem giftige Gase wie Pyrotoxine, Chlor und Brom; Letztere schädigten die Ozonschicht. Hinzu kamen weitere Umweltbelastungen: salpeter- und schwefelsaurer Regen sowie Kohlendioxid, das am Ort des Einschlags aus dem Gestein verdampfte.

Die Schichtung der Fossilien kündet von einer Abfolge ökologischer Störungen, die zu einer globalen Brandkatastrophe passt. In den unmittelbar nach dem Einschlag abgelagerten Sedimenten findet sich ein klassischer biologischer Indikator für Feuer: eine abnorm hohe Konzentration von Farnsporen, die zuerst von Robert H. Tschudy am U.S. Geolo- ▷

gical Survey entdeckt wurde. Farne (Cyathidites) waren demnach die ersten Pflanzenarten, welche die kahle Landschaft wieder besiedelten – genau wie nach heutigen Waldbränden. Die Farne traten manchmal gemeinsam mit windbestäubten Blütenpflanzen (Ulmoideipites) auf. In Ökosystemen ohne Farne kam es nach dem Einschlag manchmal zu Algenblüten.

In Sedimenten, die in den heutigen US-Bundesstaaten Colorado und Montana abgelagert wurden, hat Iain Gilmour von der britischen Open University Hinweise auf Methan oxidierende Bakterien gefunden – ein Zeichen, dass der Tod so vieler Lebewesen vorübergehend kleine Süßwasser-Ökosysteme mit extremem Sauerstoffmangel zur Folge hatte. Obwohl die ungewöhnliche Verbreitung dieser Bakterien kein direktes Indiz für Brände ist, zeigt sie ein derart umfassendes und abruptes Sterben an, dass als Erklärung eigentlich nur eine globale Feuersbrunst in Frage kommt.

In einem Gesteinsaufschluss im Raton-Becken im Südwesten der USA zeigt einer der Autoren (Kring) auf die Einschlagschicht.



DANIEL D. DURDA

Der Tag danach

Wieso vermochte überhaupt etwas das Inferno zu überstehen? Entscheidend dafür war die ungleiche Verteilung des Feuers. Wie Simulationen zeigen und Paläobotaniker bestätigen, entging der äußerste Norden Europas und Nordamerikas den schlimmsten Verwüstungen. Arthur Sweet vom Geological Survey of Canada fand heraus, dass dort, wo heute die kanadischen Northwest Territories liegen, die Pollen von Nacktsamern – von Nadelhölzern und ihren Verwandten – drastisch abnahmen, aber nicht völlig verschwanden. So überlebte ein Teil der Walddecke die Brände sogar dort, wo die Flammen das vorwiegend aus bedecktsamigen Blütenpflanzen bestehende Unterholz verschlangen. In solchen halbwegs verschonten Regionen war die Hitze weniger stark. Dort boten Sümpfe oder deren Randgebiete Pflanzen und Tieren ein wenig Schutz.

Aus der Untersuchung von fossilen Pflanzen, Sporen und Pollen folgerte Kirk R. Johnson vom Denver Museum of Nature and Science, dass in Nordamerika 51 Prozent der bedecktsamigen Arten, 36 Prozent der Nacktsamer und 25 Prozent der Farne und Farnverwandten ausgelöscht wurden. Den fossilen Pollen und Blättern zufolge kamen Bäume, die ihr Laub abwerfen konnten, besser davon als immergrüne – vielleicht, weil die Ersteren mit ihren kahlen Ästen während der finstersten Zeit gleichsam zu überwintern vermochten.

Auch windbestäubte Bäume scheinen überlebt zu haben, weil sie nicht auf Bestäubung durch Insekten und andere Tiere angewiesen waren. Tatsächlich verschwanden offenbar viele Insekten oder starben ganz aus. Das schließen Conrad C. Labandeira von der Smithsonian Institution und seine Mitarbeiter daraus, dass in Nord-Dakota, das der direkten Wucht des Einschlags entging, die fossilen Blätter drastisch verminderte Spuren von Insektenfraß aufweisen. Über die Auswirkungen auf andere Tierarten wissen die Forscher noch nicht genau Bescheid.

Allmähliche Erholung

Sweet hat gezeigt, dass das anfängliche, vom Überleben der robustesten Arten geprägte »Survival«-Ökosystem schon bald einem »opportunistischen« Ökosystem Platz machte. Es bestand aus anderen Farnen (Laevigatosporites) und verschiedenen Arten von Blütenpflanzen, die aus der ökologischen Tabula rasa Vorteil zu ziehen vermochten. Gemeinsam schufen diese Pflanzen einen krautartigen Bodenbewuchs.

In der Endphase der Erholung kehrte das Walddach zurück. Nach allen Erfahrungen mit heutigen Wäldern dauerte die Wiederkehr der Bäume mindestens hundert Jahre. Sowohl Sweet als auch Garland Upchurch vom U.S. Geo-



DAVID A. KRING



WENDY S. WOLBACH, DEPAUL UNIVERSITY

Die Chicxulub-Katastrophe hinterließ eine helle Tonschicht, etwa so dick wie ein Schweizer Messer (links). Eine Detailansicht (rechts) zeigt, dass die Schicht zweigeteilt ist. Die untere Teilschicht tritt nur in Nähe des Kraters auf und besteht aus beim Einschlag geschmolzenem Gestein. Die obere Schicht enthält Fragmente, die herabfielen, nachdem sie bis in den Weltraum emporgeschleudert worden waren, sowie Ruß von Bränden (kleines Bild).

logical Survey folgern aus dem späten Auftreten fossiler Pflanzen nach dem Einschlag, der Vorgang sei in Wirklichkeit viel langsamer abgelaufen: Er habe an die 10000 Jahre gebraucht.

Ein weiteres Maß für die Erholungsdauer ist die Reaktion des weltweiten Kohlenstoffkreislaufs. Der Verlust der Wälder, die – jedenfalls heutzutage – mehr als 80 Prozent des über dem Erdboden vorhandenen Kohlenstoffs binden, sowie die Kohlendioxidemissionen aus den Bränden und dem am Ort des Einschlags verdampften Kalkstein vermehrten auf einen Schlag den atmosphärischen Kohlenstoff.

Aus Isotopenanalysen der Einschlagsedimente schließen Nan C. Arens von der University of California in Berkeley und A. Hope Jahren von der Johns Hopkins University, dass es 130000 Jahre dauerte, bis der Kohlenstoffkreislauf auf den Kontinenten wieder ins Gleichgewicht kam.

Für das marine Ökosystem veranschlagen Steven L. D'Hondt von der University of Rhode Island und andere Forscher sogar drei Millionen Jahre, bis der Strom von organischem Material, das zuvor reichlich in die Tiefsee abgesunken war, sich allmählich wieder normalisierte.

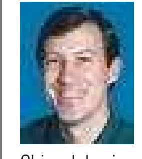
Nach der kosmischen Katastrophe von Chicxulub sah die Welt nicht nur völlig anders aus, sondern auch Gerüche und Geräusche hatten sich radikal gewandelt. Wir alle können uns dank moderner Medien in den Dschungel Amazoniens oder andere Urwälder versetzen, wenn wir der Wiedergabe von Geräuschen exotischer Vögel, Insekten und Affen lauschen. Besäßen wir Tonbänder aus der Kreidezeit, so würden vor unseren Ohren Dinosaurier durchs Unterholz brechen und laute Rufe ausstoßen. Dazwischen ließe sich das Summen einiger Insekten vernehmen. Säugetiere wären kaum zu hören: Sie würden nur zwischen den Blättern rascheln, etwa wie heutige Maulwürfe.

Tödliche Stille

Doch in den Monaten nach dem Einschlag herrschte tödliche Stille, bis auf das Rauschen von Wind, Wasser und Regen. Erst ganz allmählich machten sich wieder Insekten und später auch Säugetiere bemerkbar. Hunderte oder gar Hunderttausende von Jahren vergingen, bis sich erneut stabile Ökosysteme etablierten. Schon der vom Chicxulub-Einschlag erzeugte Feuersturm und die anschließende Umweltverschmutzung waren verheerend. Doch erst die Kombination unzähliger Umweltschäden erwies sich als tödlich. Die verschiedenen Ökosysteme wurden in unterschiedlicher Weise und verschieden dauerhaft geschädigt: Der Wiedereintritt der Trümmer in die Atmosphäre dauerte Tage, der Staub hielt sich in der Stratosphäre mehrere Monate und schwefelsaurer Regen fiel jahre- und jahrzehntelang.

Was das Leben rettete, war seine Vielfalt. Zwar gingen viele Arten und unzählige Einzelorganismen verloren, doch einige überlebten und vermehrten sich. Der Einschlag schuf ökologische Nischen für die Evolution der Säugetiere, die schließlich zur Entwicklung unserer eigenen Spezies führte. In diesem Sinne wurde der Krater von Chicxulub zum Schmelztiegel der menschlichen Evolution. ◁

AUTOREN UND LITERATURHINWEISE



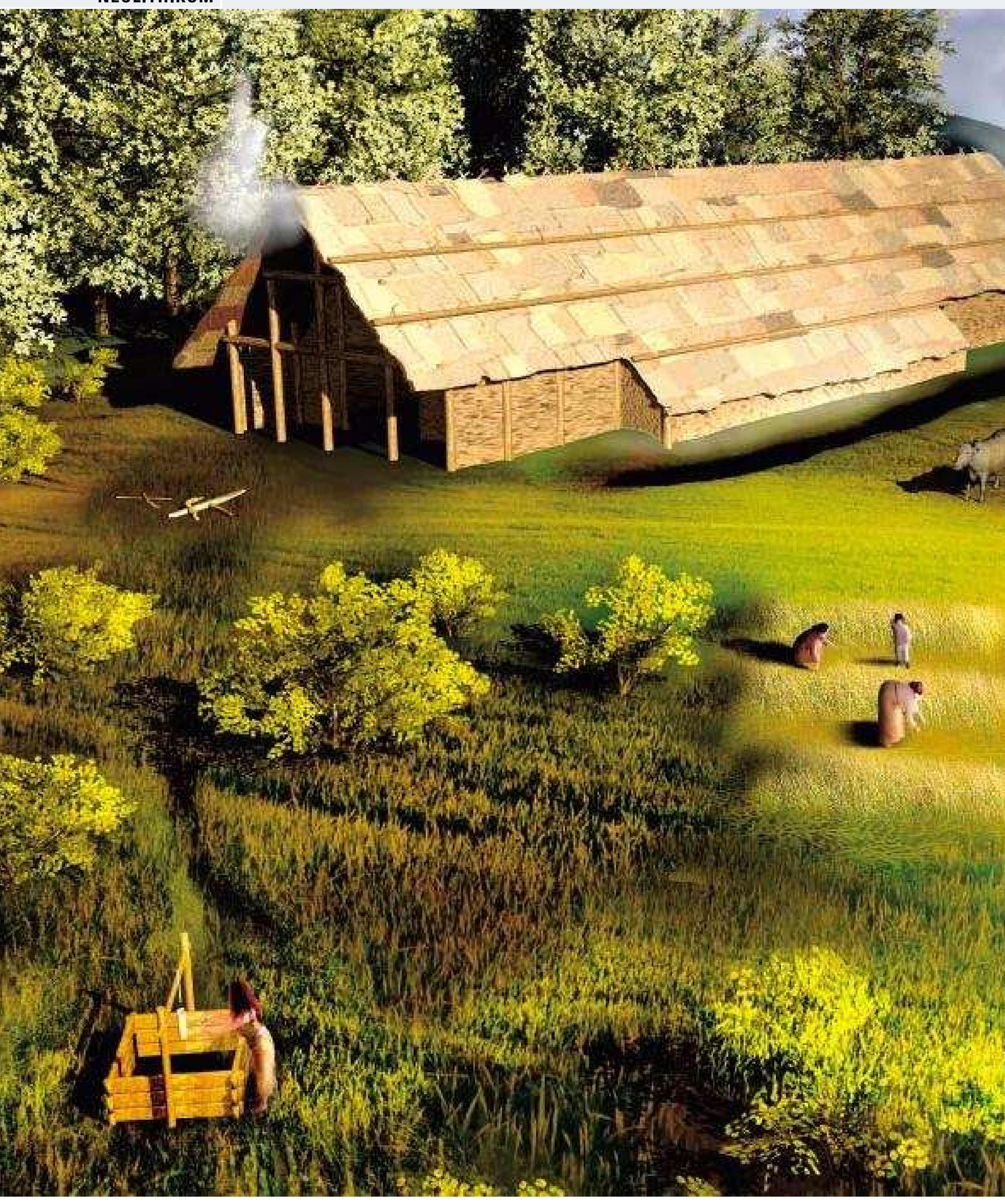

David A. Kring (links) gehörte dem Team der Universität von Arizona an, das den Krater von Chicxulub einem Asteroideneinschlag zuschrieb und mit dem Massensterben am Ende der Kreidezeit in Verbindung brachte. Er hat die ökologischen Auswirkungen von beinahe zwei Dutzend Einschlägen erforscht. **Daniel D. Durda** untersuchte die Kollisionen und Bahnbewegungen von Asteroiden. Er forscht heute am Southwest Research Institute in Boulder (Colorado). Als leidenschaftlicher Pilot nutzt er Überschall-Düsenjäger für astronomische Beobachtungen.

Das Sterben der Saurier. Von Vincent Courtillot. Thieme, Stuttgart 1999

Trajectories and distribution of material ejected from the Chicxulub impact crater: implications for postimpact wildfires. Von David A. Kring und Daniel D. Durda in: Journal of Geophysical Research: Planets, Bd. 105, S. 6 (2002)

T. rex and the crater of doom. Von Walter Alvarez. Princeton University Press, 1997

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.





SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: MUSEUM HARTING UND DETLEF GRONENBORN

Freundliche Übernahme

Als Bauern Mitteleuropa besiedelten, verschwanden die Jäger und Sammler wohl weitaus langsamer als bisher angenommen.

Von Detlef Gronenborn

Dass der Mensch sein Brot »im Schweiße seines Angesichts« gewinne, ist in der abendländischen Geistesgeschichte ein bekanntes Motiv. Damit verknüpft die Bibel den Sündenfall, mit dem sie all die Mühsal dieser Welt erklärt. Auch nichtchristliche Kulturen thematisierten den Kampf um die tägliche Nahrung in Mythologie und Religion. So keimte nach Ansicht der Cherokee-Indianer der erste Mais aus den Blutstropfen einer von ihren eigenen Söhnen ermordeten Frau – auch dort war der Beginn der Landwirtschaft mit Schuld belastet. Heute fällt es schwer, Nahrungsmitteln religiöse Bedeutung zuzumessen, haben wir doch im Supermarkt um die Ecke eher die Qual der Wahl. Doch erst seit wenigen Jahrzehnten stellt in Europa Hunger keine ernsthafte Bedrohung mehr dar.

Der Anbau von Nahrung war eine »Revolution«, wie es der australisch-britische Prähistoriker Vere Gordon Childe schon in den 1930er Jahren ausdrückte, und dieser Umbruch ist bis heute nicht wirklich verstanden. Am Ende der Eiszeit gab es nur im Nahen Osten einige Dörfer, in denen Menschen sesshaft wurden und eine frühe Landwirtschaft betrieben. Alle übrigen Regionen der Erde waren die Heimat weit verstreut lebender Gruppen von Sammlern und Jägern, die in jahreszeitlichem Rhythmus von Lagerplatz zu Lagerplatz zogen.

Aus ethnologischen Untersuchungen wissen wir, dass sich nicht nur das Leben, sondern auch das Denken solcher »Wildbeuter« grundlegend von dem in bäuerlichen Gesellschaften unterscheidet. So bleiben Sammler und Jäger nur selten an einem Ort und bilden erst komplexere Gemeinschaften aus, wenn die Reichhaltigkeit der Natur auch ohne Anbau und Viehzucht ein sesshaftes Leben ermöglicht. Die bäuerliche Gesellschaft hingegen erfordert eine arbeitsteilige Struktur und weit reichende Planung; sie erst ermöglichte das Entstehen von Städten und Staaten. Im Vergleich dazu genießen Wildbeuter wesentlich mehr »Freizeit«. Der gesellschaftliche Druck ist vielfach weniger ausgeprägt, individuelle Freiheit ein hoch geschätztes Gut. Dennoch hat sich der mit Bodenbau und Viehzucht zu erzielende materielle Wohlstand durchsetzen können. Heutzutage leben weit unter einem Prozent der Menschheit vom Sammeln und Jagen.

Welch dramatischer Wandel mit dem Aufkommen der Landwirtschaft einherging, wurde den Gelehrten nur schrittweise deutlich. Bereits Ende des 19. Jahrhunderts versuchten sie zwar die nacheiszeitlichen bäuerlichen Kulturen von den älteren Wildbeutern abzugrenzen. Doch als Hauptmerkmal wählte der britische Prähistoriker John Lubbock, ein ▷

◀ **Alltag bei den Bandkeramikern: In die dichten Wälder rodeten sie Freiflächen, bauten dort Gehöfte, hielten Vieh und legten Getreidefelder am Waldrand an. Zur Wasserversorgung gruben sie viele Meter tiefe Brunnen, die geschickt mit Holzkonstruktionen ausgekleidet und stabilisiert wurden.**

▷ Bekannter Charles Darwins, das Auftreten geschliffener Steinbeilklingen (siehe Bild S. 60). Eher nebenbei bemerkte er, dass in den Dörfern Töpferei und Webkunst entwickelt waren, ebenso die Haltung von Haustieren und der Anbau von Getreide.

Auf Grund der innovativen Steingeräte nannte er diese Phase der Menschheitsgeschichte Neolithikum (von griechisch *neo*, »neu«, und *lithos*, »Stein«); als Jungsteinzeit wurde die Epochenbezeichnung in den deutschen Sprachraum übernommen. Erst Vere Gordon Childe erkannte dann die wirkliche Bedeutung der »Neolithischen Revolution«: Dank der Möglichkeit, Überschuss zu produzieren, konnten dörfliche und später städtische Gesellschaften, ja die Staaten des Alten Orients entstehen.

Heute wissen wir allerdings, dass der Übergang sehr viel differenzierter verlief, als es das Schlagwort Revolution suggeriert: Im Nahen Osten existierten am Ende der Eiszeit zwar erste sesshafte und dörfliche Gemeinschaften, doch lebten sie noch von der Jagd, der Fischerei und dem Sammeln von Wildpflanzen. Diese Menschen mögen sich in einem Paradies gewähnt haben, denn ab 13 500 v. Chr. hatte sich das Klima gewandelt (siehe Grafik rechts). Es wurde rasch warm und im Nahen Osten breiteten sich Wälder und Grassteppen aus. In diesen reichen Biotopen gab es weitläufige Wildgetreidevorkommen und zahlreiche Tierarten – ein Umherziehen war schlicht nicht mehr notwendig.

Doch um 10 800 v. Chr. kappten Schmelzwasser des abtauenden nordamerikanischen Eisschilds den Golfstrom und für mehr als tausend Jahre herrschten in Europa und dem Nahen Osten wieder fast eiszeitliche Verhältnisse (Jüngere Dryaszeit). Die nichtsesshaften Sammler und Jäger traf diese Veränderung nicht so hart, sie mussten lediglich ihre Jagdpraktiken umstellen. Doch den Bewohnern fester Siedlungen drohte der Hunger, denn die Wälder und Graslandschaften schwanden. Es gilt heute als wahrscheinlich, dass diese Not die Menschen motivierte, jene Pflanzen anzubauen, die sie vorher in großer Menge in der Natur ernten konnten.

Reif für die Inseln

Um 9500 v. Chr. hatte sich der Golfstrom wieder stabilisiert und es wurde wärmer. Nun entstanden erste Zentren mit aufwändiger Architektur (Spektrum der Wissenschaft 9/2004, S. 36). Ihre Bewohner lebten anfänglich noch weit gehend vom Sammeln und Jagen, langsam jedoch gewann die Landwirtschaft an Bedeutung. Sie bauten Getreide und Hülsenfrüchte wie Erbsen, Linsen und Linsenwicken an, domestizierten Schafe und Ziegen, später auch Rinder.

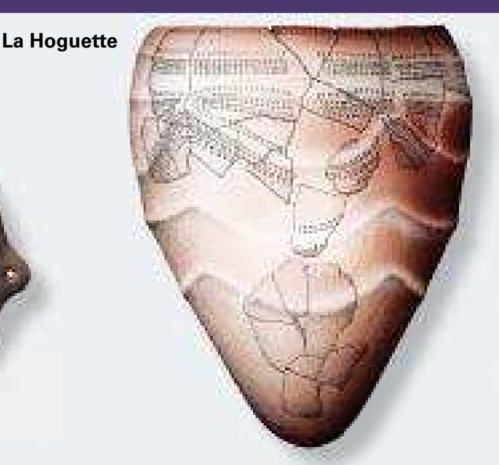
Aus dem Kernbereich des Neolithikums, dem »fruchtbaren Halbmond«, breitete sich das Bauerntum dann aus (siehe Karte rechts), um 7000 v. Chr. erreichte es Europa. Diese frühen Landwirte überquerten auf Booten von der west- und südtürkischen Küste kommend die Ägäis, von einer Insel zur nächsten. Schließlich erreichten sie Griechenlands fruchtbare Ebenen und offene Flusstäler. Offenbar waren jene fast menschenleer, denn im archäologischen Befund klaffen Lücken, so genannte Hiaten, zwischen den Hinterlassenschaften der letzten Sammler und Jäger und denen der frühen Bauern.

Von diesen frühen Kolonien ging die Expansion weiter nach Norden und um etwa 6200/6000 v. Chr. entstanden erste Dörfer im Karpatenbecken, also im heutigen Ungarn und Rumänien.

Sozusagen als Vorbote der kommenden Veränderungen hatte aber offenbar bereits einige Jahrhunderte früher, um 6500 v. Chr., die Kenntnis des Getreideanbaus den Voralpenraum und West- sowie Südfrankreich erreicht, wie Pollenanalysen belegen. Das Erstaunliche ist nur: Weder lieferten die botanischen Untersuchungen Hinweise auf großflächige Rodungen noch fand man die für eine intensive Landwirtschaft erforderlichen Geräte. Feste Dörfer haben in den dichten mittel- und westeuropäischen Wäldern zu dieser Zeit auch nicht gestanden. Offensichtlich wurde Getreide lediglich in kleinen Gärten gezogen. Es scheint wenig glaubhaft, dass dieser Technologietransfer in Gebiete etwa des heutigen Süddeutschlands durch die Einwanderung von frühen Siedlern aus den griechischen Niederlassungen erfolgt sein soll. Wahrscheinlicher ist, dass hier Wissen über weit reichende Handelskontakte transportiert wurde. Schmuckschne-

Keramik im Bauernstil

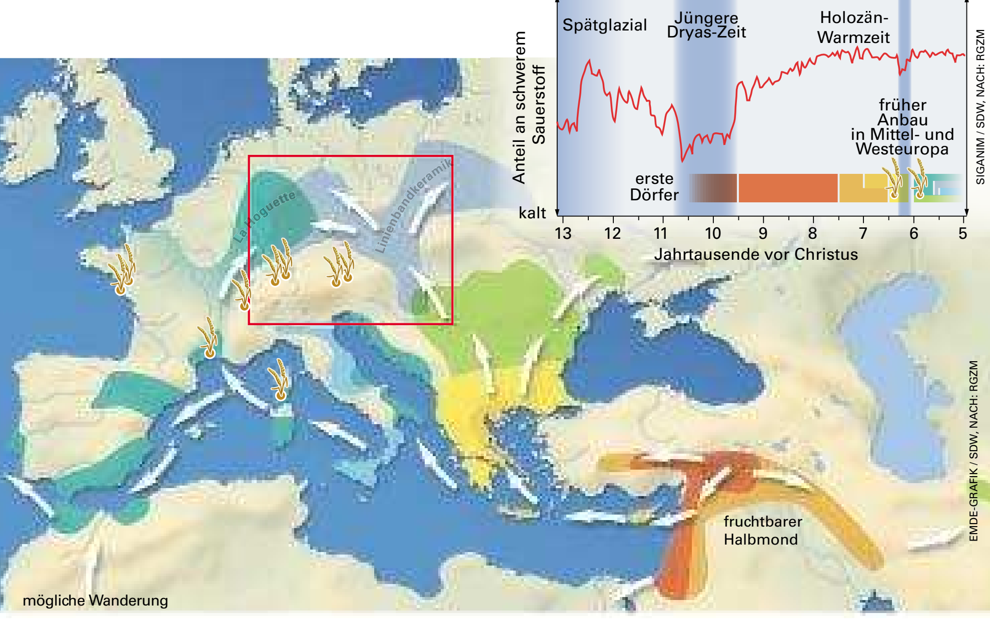


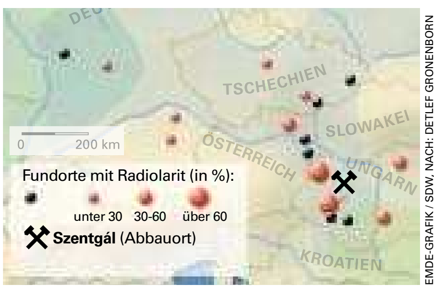


Die Gefäße der bandkeramischen Kultur unterscheiden sich in Form und Schmuck deutlich von denen der La-Hoguette-Tradition. Eingeritzte breite Bänder gaben der Kultur ihren Namen. Ab etwa 5600 v. Chr. fertigten auch Mitteleuropäer die in Südfrankreich beheimatete La-Hoguette-Keramik, für die girlandenähnliche Bänder und eingestochene Verzierungen typisch sind. Diese Menschen waren noch nicht sesshaft, auch wenn sie bereits Schafe und Ziegen hielten und mitunter in kleinen Gärten Getreide anbauten.

SIGANIM / SDW, NACH: »WESTLICHE NACHBARN DER BANDKERAMISCHEN KULTUR«. VON J. LÜNING UND U. KLOOS, GERMANIA BAND 67, 1989

Aus dem »fruchtbaren Halbmond« verbreitete sich die Neolithische Revolution – nach einer Unterbrechung durch einen Kälteeinbruch um 6200 v. Chr. – bis nach Mitteleuropa (große Karte und Klimakurve). Dort wurde zwar schon mit Gartenbau experimentiert, doch eine Landwirtschaft konnte sich erst mit der klimatischen Stabilisierung durchsetzen. Von weit reichenden Handelskontakten zeugt die Feuersteinart Radiolarit aus dem Karpatenbecken: Sie wurde über 800 Kilometer transportiert (Karte unten).





cken und Feuersteine, die über Hunderte von Kilometern transportiert worden sein müssen, belegen solche Handelsverbindungen in das Karpatenbecken in der zweiten Hälfte des 7. Jahrtausends.

Diese Schritte zu einer frühen, experimentellen Phase der Landwirtschaft wurde durch das so genannte 6200-Ereignis unterbrochen: Erneut kappten Schmelzwasser vom nordamerikanischen Eisschild den Golfstrom. Im Nahen Osten wurden viele große Siedlungen für zwei- bis dreihundert Jahre aufgelassen, wie Bernhard Weninger von der Universität Köln anhand von Radiokarbondaten zeigte. Vermutlich waren die Bauern gezwungen, eine nichtsesshafte Lebensweise anzunehmen oder sich in kleinere Gruppen aufzusplittern.

Doch um 6000 v. Chr. besserten sich die Verhältnisse wieder und nun erschlossen sich Kolonisten in kurzer Zeit den westlichen Mittelmeerraum, entlang den Küsten über Italien, Südfrankreich bis zur iberischen Halbinsel und nach Nordafrika. Selbst weit auseinander liegende Regionen wurden fast zur gleichen Zeit besiedelt, was eine Expansion durch Küstenseefahrt wahrscheinlich macht. Die im Mittelmeerraum arbeitenden Archäologen nennen dies »Bocksprungkolonisation« *(leap frog colonization)*: Kleine Gruppen errichten in weit entfernten Küstengebieten Pioniersiedlungen, von denen die einheimische Bevölkerung allmählich technische und kulturelle Neuerungen übernimmt. Ab etwa 6000 v. Chr. lebten in Süditalien, 200 bis 300 Jahre später auch in Südfrankreich und an den Küsten der iberischen Halbinsel Gruppen zumindest teilweise von Bodenbau und Viehzucht, auch wenn sie noch nicht ganzjährig in Siedlungen wohnten. Von Südfrankreich aus breitete sich diese Mischform von Bodenbau, Viehzucht und Jagd weiter in die Regionen nördlich der Alpen aus. Wiederum folgte man hier alten Verkehrsverbindungen entlang der Rhône und dem Doubs bis ins Rhein- und Moseltal und weiter nach Osten.

Rätselhafte Expansion

Die Menschen in Mitteleuropa übernahmen die wirtschaftlichen Anregungen aus Südfrankreich und lebten ab etwa 5600 v. Chr. außer von der Jagd auch von der Schaf- und Ziegenzucht. Da der Getreideanbau ja bereits seit 500 Jahren bekannt war, dürften sie auch weiter kleine Gärtchen angelegt haben. Dennoch zogen die Gruppen in jahreszeitlichem Rhythmus von Lagerplatz zu Lagerplatz. Gleichzeitig begannen sie nun Keramik herzustellen, die nach einem in Frankreich liegenden Fundplatz »La Hoguette« genannt wird und ganz ähnlich zu südfranzösischen Vorbildern ist (siehe Bild links).

Um die weitere Entwicklung zu verstehen, müssen wir uns wieder in den nördlichen Balkan begeben: Im heutigen Nordwestungarn und in der Südwestslowakei entwickelte sich irgendwann zwischen 5700 und 5600 v. Chr. eine Kultur, deren Kennzeichen Keramikgefäße mit linearen und bandförmigen Mustern waren. Daher wird sie auch als »bandkeramische Kultur« bezeichnet (siehe Bild links). Die Menschen im Ursprungsgebiet dieser Kultur müssen über mehrere Jahrhunderte Kontakt mit den bäuerlichen Siedlungen im nördlichen Balkan gehabt haben, von denen sie Keramik, aber auch die Landwirtschaft mit Getreideanbau und Viehzucht (Schafe, Ziegen und Rinder) übernahmen. Im Gegensatz zu den nomadischen Viehzüchtern im Westen wohnten die Bauern im Karpatenbecken aber in festen und bis zu acht mal zwanzig Meter großen Häusern.

Aus ihrem Kernbereich in Nordwestungarn und der Südwestslowakei begann sich diese Kultur bald auszubreiten. Warum, ist noch ein Rätsel, obwohl sich Forscher seit mehr als siebzig Jahren damit befassen. Vielleicht waren es schlicht weltanschauliche Gründe, die den Wunsch nach neuem Land weckten. Tatsächlich sind aus Afrika Völker bekannt, die der Expansion an sich einen hohen Wert beimessen. Möglicherweise hatte auch eine rasch zunehmende Bevölkerung die Suche nach neuem Land notwendig gemacht. Jörg Petrasch von der Universität Tübingen errechnete eine Bevölkerungswachstumsrate zwischen 0,9 bis 1,4 Prozent, was für vorgeschichtliche Gesellschaften hoch ist.

Warum auch immer sie stattfand, die Geschwindigkeit, mit der die bandkeramische Kultur neue Lebensräume eroberte, ist bemerkenswert: Innerhalb von ▷

etwa 200 Jahren hatte sie im Westen den Rhein und im Norden die Oder erreicht. Dabei gelangten auch Steinwerkzeuge aus Radiolarit, einer aus dem Karpatenbecken stammenden Feuersteinart, bis in die Wetterau in Hessen, über eine Entfernung von etwa 800 Kilometern (siehe Karte vorige Seite). Ethnologen zufolge basiert solch ein Tauschhandel oftmals auf engen Kontakten innerhalb von Verwandtschaftsgruppen. Zeigt die Verteilung der Radiolaritfunde also das Netz verwandter Sippen, die aus dem Karpatenbecken nach Westen vordrangen und Pioniersiedlungen in den mitteleuropäischen Wald schlugen? Die ansässigen Sammler und Jäger wären ihnen dabei kaum im Weg gewesen, denn die dichten Wälder boten diesen keinen Lebensraum – es gab dort zu wenig Wild.

SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: WÜRTTEMBERGISCHES LANDESMUSEUM

Pfeilspitze aus Feuerstein

Originalgröße

SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: DETLEF GRONENBORN

Eine Pfeilspitze aus dem bandkeramischen Fundplatz Bruchenbrücken in der Wetterau bezeugt weitläufige Handelskontakte: Das Rohmaterial stammt aus dem 250 Kilometer entfernten Maastal bei Maastricht. Vermutlich wurde die Spitze bei Tauschgeschäften mit Jägern erworben. Mit Beginn des Neolithikums tauchen geschliffene Beilklingen auf den Fundplätzen auf, die in so genannten Knieholmen geschäftet waren.

Dieses Szenario entspricht den Vorstellungen der »Migrationisten«. Ihr Kredo ist die massive Einwanderung neolithischer Siedler während all dieser verschiedenen Phasen. Das Hauptargument: Es gäbe zu wenig Funde einheimischer Sammler und Jäger. Offenbar spielten diese kulturell und populationsdynamisch keine Rolle, wären schnell von den einwandernden Bauern assimiliert worden. Die Migrationisten argumentieren auch mit der Ausbreitung von Sprachfamilien; wortführend ist hier der in Cambridge lehrende britische Prähistoriker Colin Renfrew. Er hatte schon in den 1980er Jahren eine Theorie entwickelt, nach der die indoeuropäische Grundsprache im Zuge der Ausbreitung von Bodenbau und Viehzucht nach Europa gelangt sei. Genau genommen postulierte Renfrew, die bandkeramischen Immigranten hätten Indoeuropäisch gesprochen und die spärlichen lokalen Gruppen sprachlich und kulturell überprägt. Allerdings: Wann genau das von Sprachforschern rekonstruierte Indoeuropäisch seinen Einzug gehalten haben soll, ist bis heute sehr umstritten. Nicht einmal die Existenz einer »Ursprache« gilt als sicher.

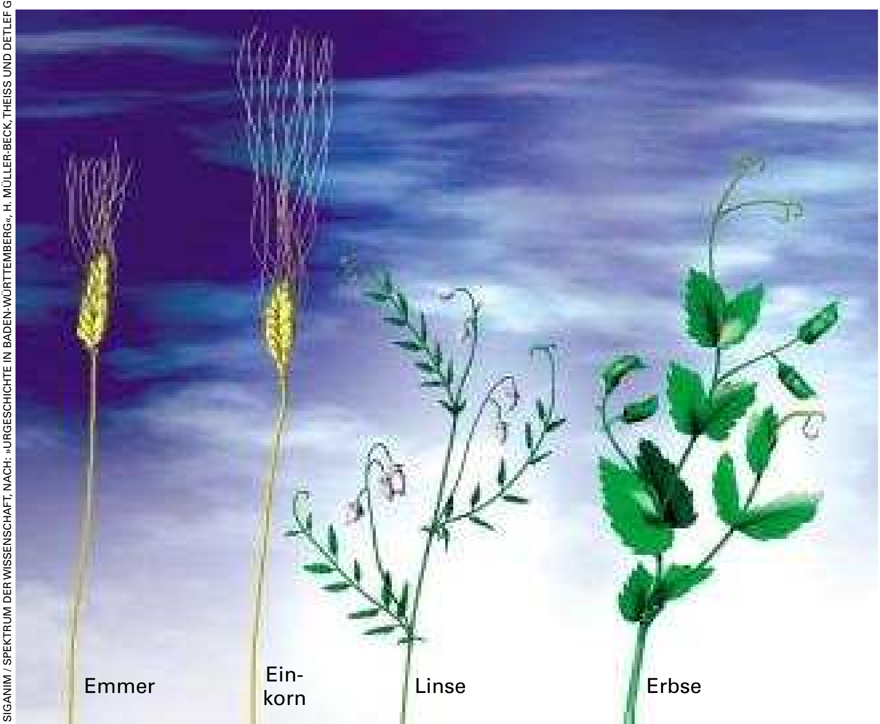
Nicht alle Forscher stimmen diesem Szenario zu. Einige Kollegen, der prominenteste Vertreter ist Alasdair Whittle von der Universität Cardiff, sehen die Neolithisierung als Diffusionsprozess. Nicht Menschen seien gewandert, sondern technologische Neuerungen und die Wirtschaftsweise. Diese Indigenisten verweisen auf die frühen Versuche mit dem Getreideanbau im Voralpenland: Die wichtigsten Grundlagen seien damals schon gelegt worden, die entwickelte Landwirtschaft entspräche demnach nur einer Intensivierung der neuen Technologien. Kenntnisse zum Hausbau und zur Viehwirtschaft hätten sich über die sozialen Netzwerke ausgebreitet.

Indigenisten und Migrationisten standen sich lange Zeit fast unversöhnlich gegenüber, aber möglicherweise liegt die Lösung in der goldenen Mitte. Denn neuere archäologische Befunde belegen die Koexistenz unterschiedlicher Kulturtraditionen. Dies konnte etwa am bandkeramischen Weiler bei Bruchenbrücken in der Wetterau nachgewiesen werden; er war etwa zwischen 5350 und 5150 v. Chr. bewohnt. Bei Grabungen in den 1980er Jahren kamen neben den typischen bandkeramischen Gefäßen auch Scherben der La-Hoguette-Keramik zu Tage. Offensichtlich haben hier zwei Menschengruppen mit unterschiedlichen Keramikstilen zumindest zeitweise an einem Ort zusammengelebt. Es ist durchaus vorstellbar, dass das Bauerndorf von den Sammlern und Jägern im Zuge ihrer jährlichen Wanderungen besucht wurde.

Die Hypothese eines friedlichen Nebeneinanders von bäuerlichen Immigranten und lokalen Gruppen auch in anderen Siedlungen der frühen Jungsteinzeit stützen naturwissenschaftliche Analysen von Knochen und Zähnen. Anhand des Gehalts an Strontiumisotopen lässt sich erkennen, ob Verstorbene im Umkreis des Bestattungsorts aufgewach-







SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: »URGESCHICHTE IN BADEN-WÜRTTEMBERG«, H. MÜLLER-BECK, THEISS UND DETLEF GRONENBORN

Schaf und Ziege gehörten zu den ersten Zuchttieren, das Rind kam später dazu. Zu den seit frühester Zeit angebauten Pflanzen gehören archaische Getreidearten wie Emmer und Einkorn, aber auch Hülsenfrüchte wie Erbse, Linse und Linsenwicke. Wildformen all dieser Tiere und Pflanzen existierten im »fruchtbaren Halbmond«.

sen waren oder erst später dorthin kamen. Strontium wird über Nahrung und Trinkwasser aufgenommen und in den harten Körpergeweben fest eingebaut. Ist deren Wachstum abgeschlossen, ändert sich das Verhältnis der verschiedenen Isotope nicht mehr. Die in der Jugendzeit ausgebildeten Zähne weisen daher bei einer Verlagerung des Wohnplatzes ein anderes Signal auf als die sich auch später noch ständig umwandelnden Knochen.

Friedliches Miteinander

Aufschlussreich ist ein Friedhof bei Schwetzingen südlich der Neckarmündung. Etwa 30 Prozent der Frauen und 19 Prozent der Männer, die dort zwischen 5150 und 5000 v. Chr. zu Grabe getragen wurden, waren zugewandert. Ein Vergleich der Isotopenverteilung mit Referenzdaten zeigt: Sie kamen wahrscheinlich von den Höhenzügen des Odenwalds, des Schwarzwalds, des Elsass und des Pfälzer Walds. Von dort gibt es leider bislang kaum Funde aus den fraglichen Jahrhunderten. Doch wäre es durchaus möglich, dass hier noch für längere Zeit Wildbeuter lebten. Die Siedlungen der bandkeramischen Kultur waren sicherlich wirtschaftliche und soziale Anziehungspunkte und mancher Besucher mag gern geblieben sein. Tatsächlich wäre das enorme Anwachsen der Anzahl von Dörfern und Weilern um den Faktor zehn zwischen 5500 und 5000 v. Chr. kaum ohne einen solchen Zuzug zu erklären.

Auch molekulargenetische Untersuchungen belegen, dass die Gesellschaft der frühen Jungsteinzeit »multikulturell« war. Zum Beispiel konstatierte eine Arbeitsgruppe um Martin Richards von der Universität Leeds in England auf Grund von genetischen Analysen an der modernen europäischen Bevölkerung: Der Anteil der aus Vorderasien während des Neolithikums eingewanderten Personen habe in Europa insgesamt unter zwanzig Prozent gelegen. Diese Untersuchungen basieren allerdings auf Daten der modernen europäischen (sowie afrikanischen wie auch nahöstlichen) Bevölkerung. Mittels der so genannten molekularen Uhr wurde die Entstehung einzelner DNA-Linien zurückdatiert. Das ist problematisch, denn die Zeitangaben sind so ungenau, dass statt neolithischen auch frühere oder spätere Ereignisse erfasst werden können. Verlässlicher sollten Vergleiche anhand originaler Erbsubstanz sein. Doch die Gewinnung alter DNA (aDNA) aus Funden jener Zeit ist bislang nur bei Rinderknochen gelungen.

So stellt sich die neolithische Revolution in Mitteleuropa heute als komplexer, mehr als tausend Jahre dauernder Prozess dar. Dank jahrzehntelanger Forschung erkennen wir langsam das Gesamtbild, doch der Teufel steckt oft noch im Detail. Die Entwicklung neuer archäologischer und naturwissenschaftlicher Methoden hat unsere Vorstellung von dieser für die Geschichte Europas, ja der gesamten Welt so ungeheuer wichtigen Periode verändert. Und niemand kann sich sicher sein, dass die Zukunft nicht einige Überraschungen bereithält, die bisherige Erkenntnisse erneut in Frage stellen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Nach dem Studium der Vor- und Frühgeschichte in Köln und Frankfurt lehrte **Detlef Gronenborn** an Universitäten in Frankfurt, Bamberg, Göttingen und Gainesville in Florida. Seit 2002 forscht er am Römisch-Germanischen Zentralmuseum in Mainz und lehrt an der Mainzer Johannes-Gutenberg-Universität. Neben der Neolithisierung gehört auch die Entstehung und Entwicklung von Königreichen in Westafrika zu seinen Forschungsthemen.

Die Neolithisierung im Vorderen Orient. Theorien, archäologische Daten und ein ethnologisches Modell. Von Marion Benz in: Studies in Early Near Eastern Production, Subsistence, and Environment, Bd. 7, ex oriente, Berlin 2000

Steinzeitliche Bauern in Deutschland. Die Landwirtschaft im Neolithikum. Von Jens Lüning. Universitätsforschungen zur prähistorischen Archäologie Band 58, Habelt, Bonn 2000

Colin Renfrew: Die Indoeuropäer – aus archäologischer Sicht in: Spektrum der Wissenschaft. Dossier: Evolution der Sprachen, 1/2000, S. 40

Frühtests auf Rinderwahnsinn

Deutsche Behörden registrierten 2004 noch über sechzig BSE-Rinder. Empfindlichere Tests erlauben es inzwischen, die Infektion immer früher zu diagnostizieren. Der NOBELPREISTRÄGER STANLEY B. PRUSINER ist überzeugt, dass bald Medikamente gegen Prionenkrankheiten zur Verfügung stehen werden.

Von Stanley B. Prusiner

Bis vor vier Jahren wähnte sich Deutschland BSE-frei. Doch dann schockierte im November 2000 der erste hier zu Lande diagnostizierte Fall die Öffentlichkeit. Noch 2004 fanden die Labors bei über 60 Schlachtrindern Anzeichen für die Prionen, die eine bovine spongiforme Encephalopathie (»Rinderhirnschwamm«) verursachen, inzwischen addiert es sich auf über 350. Noch länger glaubte sich Nordamerika von der Gefahr verschont. Für einigen Aufruhr sorgte deswegen der erste erkannte Fall in den USA kurz vor Weihnachten 2003, nachdem im selben Jahr auch Kanada seine erste im eigenen Land geborene BSE-Kuh entdeckt hatte.

Weniger überraschten diese Nachrichten die Experten, die sich mit BSE und ähnlichen Krankheiten befassen. Dass es schwer sein würde, die Ausbreitung der BSE-Prionen zu verhindern, haben die Forscher schon lange erkannt. Gleiches gilt für die Sicherheitsgarantie von Fleisch und daraus gewonnenen Nahrungsmitteln. Die Übertragbarkeit der Erreger auf den Menschen war lange unklar, gilt inzwischen aber als erwiesen. Die bisher stets tödliche Erkrankung wird als neue Variante der länger bekannten Creutzfeldt-Jakob-Krankheit (englisch abgekürzt CJD) eingestuft.

Nach einer Infektion vergehen bis zu den ersten Symptomen einer Erkrankung – Verhaltens- und Bewegungsstörungen – beim Rind Jahre, beim Menschen wohl auch Jahrzehnte. Deswegen suchen die Wissenschaftler dringend nach immer besseren Verfahren, um einerseits infiziertes, möglicherweise ansteckendes Vieh zu erkennen – andererseits aber, um Menschen mit einer drohenden Prionenerkrankung frühzeitig zu therapieren.

Gewagte Theorie

Den Begriff »Prion« prägte ich Anfang der 1980er Jahre als Bezeichnung für proteinartige infektiöse Partikel. Damals entwarf ich die These, dass CJD und die Traberkrankheit der Schafe durch ein Agens verursacht würden, das nichts weiter sei als ein schädliches Protein (siehe meinen Artikel in Spektrum der Wissenschaft, 12/1984, S. 48). Zu jener Zeit war BSE noch nicht bekannt, wohl aber seit über zwei Jahrhunderten die Traberkrankheit, im Englischen Scrapie genannt, weil sich die Tiere dauernd kratzen. Auch rätselten Antropologen seit den 1950er Jahren über die Gehirnkrankheit Kuru, die damals bei den Fore grassierte, einem Stamm in Neuguinea mit einem Totenkult, bei dem man das Gehirn von Verstorbenen aß.

Anfangs nahm mich kaum jemand ernst. Pathogene ohne Erbgut, also ohne DNA oder RNA, widersprachen jeder wissenschaftlichen Erfahrung. Wie sollten sie sich vermehren können? Doch bisher bewährte sich mein Konzept in der Forschung. Wir kennen heute verschiedene von Prionen verursachte Erkrankungen bei Mensch und Tier, so auch eine Form, die in Nordamerika Hirsche heimsucht (siehe meinen Artikel in Spektrum der Wissenschaft 3/1995, S. 44). Die Experten bezeichnen die Prionenkrankheiten insgesamt auch als TSE (transmissible spongiforme Enzephalopathien).

Was von den Forschungsergebnissen am meisten verblüffte: In ihrer Normalform schaden Prionproteine, kurz PrP, gar nicht! Alle soweit untersuchten Tiere tragen dafür Gene. Die Normalversion, bezeichnet als PrP^{C} (C für englisch *cellular*), tritt hauptsächlich in Nervenzellen auf. Erst wenn sie eine falsche Gestalt annehmen, wirken die Proteine fatal (siehe Kasten S. 65). Die abnorme Form bezeichnen die Forscher als PrP^{Sc}, wobei Sc für Scrapie steht, die bis vor Kurzem bestuntersuchte Prionenkrankheit. Der klaren Unterscheidung halber spreche ich nur bei der infektiösen Form von Prionen, ansonsten von Prionproteinen.

Anders als die Normalversion neigen die deformierten Proteine zum Verklumpen. In dem Zustand widerstehen sie den üblichen Desinfektionsverfahren durch Hitze, Bestrahlung oder chemische Substanzen. Eigentlich gefährlich macht die abnormen Eiweißstoffe aber, dass sie ihre falsche Form normalen Prionproteinen aufzwingen (siehe Kasten auf S. 67).

An sich schützen sich Zellen vor falsch gefalteten Proteinen, indem sie

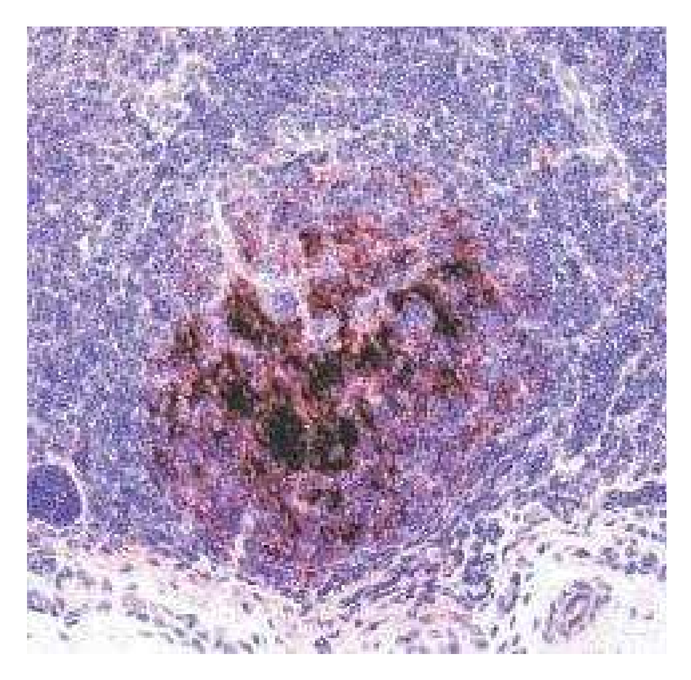

YUN SUK-BONG / EPA

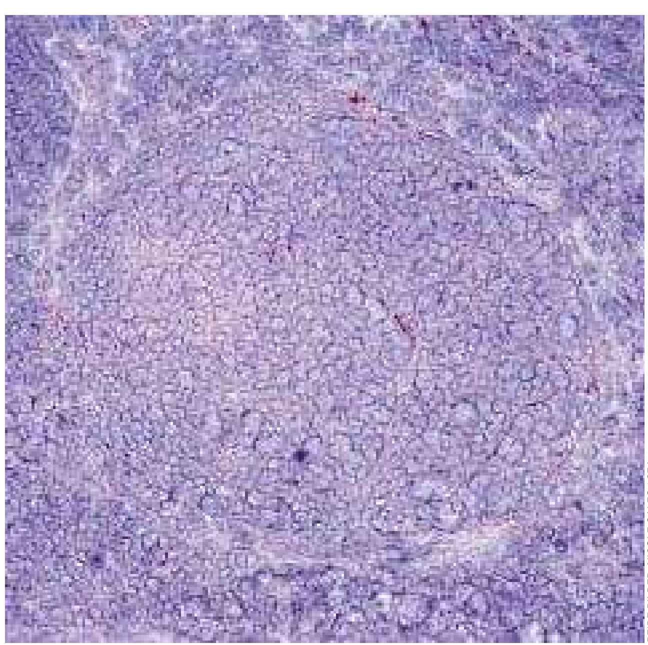
Die BSE-Epidemie hat den internationalen Lebensmittelmarkt schwer getroffen. Hier nimmt eine Mitarbeiterin in Südkorea Proben, um die Herkunft der Ware zu überprüfen.

diese vernichten. Wenn aber neues PrP^{Sc} schneller entsteht als sie abbauen können, reichern sich die verklumpten Moleküle an, bis die Zellen zerbersten. In mikroskopischen Präparaten von krankem Hirngewebe sind sowohl die Ablagerungen zu erkennen wie auch viele winzige löchrige Stellen. Es wundert nicht, dass solche fast schwammig zerstörten Gehirne nach und nach den Dienst versagen.

Nicht jede Prionenkrankheit beruht auf einer Infektion, auch nicht beim Menschen. Viel öfter kommt es dazu ohne erkennbare Ursache – sporadisch, wie die Mediziner sagen. Auch die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit (CJD) tritt meistens spontan auf, im Jahr etwa bei einem von einer Million Menschen und gewöhnlich bei älteren Personen. Deutlich seltener sind vererbte Formen von CJD sowie zwei ähnliche erbliche Leiden: das Gerstmann-Sträußler-Scheinker-Syndrom und die tödliche familiäre Schlaflosigkeit. Diese Krankheiten gehen auf Mutationen im Priongen zurück, von denen Forscher bisher über dreißig verschiedene aufgezeigt haben.

Der Rinderwahnsinn trat Mitte der 1980er Jahre in Großbritannien auf (siehe Kasten S. 69). Wir wissen heute, dass ▷





BEIDE BILDER: NICOLE SALES / CEA

Deutlich ist der Befall mit Prionen im linken Präparat einer Affenmandel erkennbar. Das Tier wurde mit dem BSE-Erreger infiziert. Das rechte Präparat stammt von einem gesunden Affen.

infiziertes Tiermehlfutter die Epidemie verursachte. Es dauerte damals einige Jahre, bis Experten und Behörden darauf aufmerksam wurden, die Krankheit als solche erkannten und endlich erste Gegenmaßnahmen ergriffen. Die Zusammenhänge waren selbst für die Wissenschaft zu unerwartet, um gleich Erklärungen zu finden und die Infektionswege aufzudecken. Wie sollte hitzebehandeltes Tiermehl, selbst wenn es von kranken Schafen oder Rindern stammte, Erreger übertragen können?

Die lange Inkubationszeit erschwerte die Sache. Jahrelang verfütterten britische Landwirte ihren Kühen Produkte aus BSE-Rinderkadavern und verbreiteten so den Erreger. Zögerlich verhängte die britische Regierung 1989 erste Futterverbote. Unter Kontrolle kam die Situation auf dem Inselreich aber erst nach 1996 mit dem strikten Untersagen jeglicher Verfütterung von Tierprodukten. Bis heute registrierten die britischen Behörden in über 180000 Fällen BSE. Auf dem Höhepunkt der Epidemie im Jahr 1992 verzeichnete Großbritannien 37280 infizierte Stück Vieh. Noch im Jahr 2003 gab es 612 offizielle britische BSE-Fälle, auch 2004 nicht wesentlich weniger. Nach epidemiologischen Modellen dürfte die Gesamtzahl der britischen BSE-Rinder um den Faktor zehn höher liegen als registriert.

Die anfänglichen Beteuerungen der britischen Regierung, der Mensch könne sich an Rindfleischprodukten von infizierten Tieren nicht anstecken, erwiesen sich als falsch. Im März 1996 berichteten Robert Will, James Ironside und Jeanne Bell von der Nationalen CJD-Überwachungseinheit in Edinburgh von elf britischen Teenagern und jungen Erwachsenen, die an einer bis dahin unbekannten Variante der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit gestorben waren (Mediziner nennen die neue Variante vCJD). Die Prionenablagerungen in den Gehirnen der Verstorbenen unterschieden sich deutlich von dem Muster bei anderen CJD-Patienten. Auch die Krankheit selbst verläuft anders.

Anfangs bezweifelten viele Wissenschaftler den vermuteten Zusammenhang zwischen BSE und der neuen Creutzfeldt-Jakob-Variante. Mich selbst überzeugte schließlich eine Anzahl einschlägiger wissenschaftlicher Studien. Beispielsweise injizierten Michael Scott und Stephen DeArmond von der Universität von Kalifornien in San Francisco in Mäuse Prionen, die entweder von BSE-Rindern stammten oder von Menschen mit CJD. In das Erbgut der Nager hatten sie das Rinder-PrP-Gen eingeschleust, die Tiere für Prionen also praktisch zu Rindern gemacht. Neun Monate nach der Infektion des mutmaßlich infektiösen Materials wurden die Mäuse krank. Die Symptome für eine Hirnzerstörung waren in beiden Teilgruppen der Tiere die gleichen.

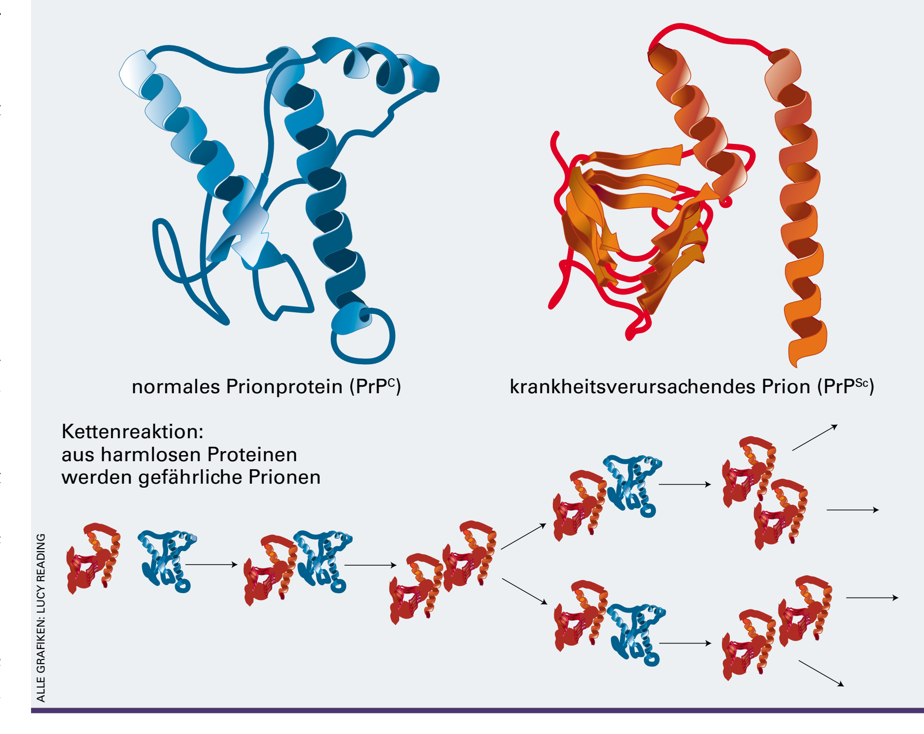
Zwischen 1995 bis Ende 2004 sind in Großbritannien etwa 150 Menschen an der neuen Creutzfeldt-Jakob-Variante gestorben, in anderen Ländern schon

IN KÜRZE

- Der durch **Prionen** übertragbare **Rinderwahnsinn** BSE hat sich nach bisheriger Kenntnis in rund dreißig Länder ausgebreitet, teils nur durch Einzelfälle belegt. Fast 190000 BSE-Rinder sind bisher aufgetaucht, davon weit über 180000 allein in Großbritannien.
- Infektionsstadien vor Ausbruch der Krankheit sind mit älteren Prüfverfahren nicht nachweisbar. Nun stehen **neuere Tests** zur Verfügung, die sich auch zur Untersuchung jüngerer und äußerlich gesunder Rinder eignen. Zukünftig sollen damit auch Bluttests möglich werden.
- Der Autor plädiert für eine **lückenlose Überprüfung** aller Schlachtrinder mit den empfindlichsten Tests, die zur Verfügung stehen, solange das Verhalten der Prionen nicht völlig geklärt ist.

Vermehrung durch Dominoeffekt

Wodurch normale Prionproteine PrP^{C} (blau) der abnorm gefalteten Version PrP^{Sc} (rot) zum Opfer fallen und sich selbst in krankheitsverursachende Prionen verwandeln, wissen die Forscher noch nicht genau. Irgendwann können befallene Zellen die Übermacht verkehrter Proteine offenbar nicht mehr beherrschen, und das Hirngewebe geht zu Grunde.



über zehn, allein sieben davon in Frankreich (siehe Kasten S. 69). Wie viele bisher Gesunde gefährliche Prionen in sich tragen, weiß niemand. Nach manchen epidemiologischen Modellrechnungen sind noch ein paar dutzend Kranke zu erwarten. Allerdings könnten einige zu Grunde gelegte Annahmen falsch sein, etwa die, dass nur Menschen mit einer bestimmten genetischen Veranlagung gefährdet sind. Neuerdings äußerten Forscher den Verdacht, dass die Krankheit bei anderer genetischer Ausstattung vielleicht mit noch größerer Zeitverzögerung auftritt und vielleicht auch langsamer verläuft.

Bei vCJD-Patienten reichert sich das abnorme Prionprotein nicht nur im Gehirn an, sondern auch in den lymphatischen Organen – wie Mandeln und Blinddarm. Nachweislich lassen sich bei Tieren Prionen nicht nur durch infiziertes Tiermehl, sondern auch durch Bluttransfusionen übertragen. Der Verdacht besteht, dass auch beim Menschen CJD durch Blut oder medizinische Geräte übertragbar ist. Deswegen haben manche Länder für den Menschen diesbezüglich scharfe Bestimmungen erlassen. In Großbritannien dürfen Kinder, die nach 1996 geboren sind, kein Blut von Einheimischen erhalten. Für ältere Jahrgänge gilt das nicht, weil sie schon ein Risiko aus der Zeit vor den strengen Futtererlassen tragen. In den USA darf kein Blut spenden, wer zwischen 1980 und 1996 mindestens drei Monate in Großbritannien gelebt hat. In Deutschland sind keine Blutspenden von Personen zugelassen, die sich zwischen 1986 und 1996 insgesamt länger als sechs Monate auf dem Inselreich aufgehalten haben.

BSE-Kuh zu Hundefutter

Ich halte die rigiden Maßnahmen für gerechtfertigt. In Großbritannien gab es Blutspender, die später an vCJD erkrankten. Ein Empfänger starb vor gut einem Jahr an der gleichen Krankheit. Da die Bluttransfusion über sieben Jahre zurücklag, könnte er sich im Grunde genauso gut irgendwann über Nahrung infiziert haben. Sein Alter spricht eher dagegen. Er starb mit 69 Jahren. Die meisten vCJD-Patienten waren nicht einmal halb so alt.

Rund dreißig Länder verzeichnen heute BSE-Fälle. Die meisten der Rinder lebten in Europa, aber auch Japan ist seit 2001 betroffen und registrierte inzwischen etwa ein Dutzend Nachweise. Welche Folgen ein mangelndes Gefahrenbewusstsein haben kann, zeigt der Fall einer BSE-Kuh aus Kanada. Sie wurde im Januar 2003 geschlachtet und zu Hunde- und Katzenfutter verarbeitet, das in die USA ging. Erst im April des Jahres testeten die kanadischen Veterinärbehörden Proben von der Kuh auf BSE.

Durch den Rinderwahnsinn leidet natürlich auch die Fleischwirtschaft betroffener Länder. Wohl wäre die beste Gewähr für die Sicherheit des Verbrauchers, alles Schlachtvieh sofort auf abnorme Prionen zu untersuchen und befallene Tiere grundsätzlich von der Nahrungsmittelproduktion auszuschließen. Doch das ist leichter gesagt als getan.

Zum einen sind lückenlose Tests aufwändig und teuer. Die meisten zugelassenen Verfahren zeigen Prionen außerdem erst bei hoher Konzentration an, auch die meisten üblichen Schnelltests. Bei infizierten Rindern, die noch nicht erkrankt sind, also auch bei infiziertem Jungvieh, gelingt der Nachweis damit in der Regel nicht. Auch wissen wir bisher nicht, ob die Milch von BSE-Kühen Prionen enthalten kann. Dies wird derzeit in meinem Labor geprüft.

Die Verfahren zum Nachweis der Rinderseuche werden zwar immer genauer und empfindlicher, sind aber noch lange nicht ideal. In der EU sind gegenwärtig fünf so genannte Schnelltests zugelassen, mit denen eine BSE-Infektion im fortgeschrittenen Stadium an geschlachteten Tieren binnen einiger Stunden nachweisbar ist. Wesentlich besser wären Tests am lebenden Tier, etwa anhand von Blutuntersuchungen. Firmen entwickeln solche Verfahren bereits.

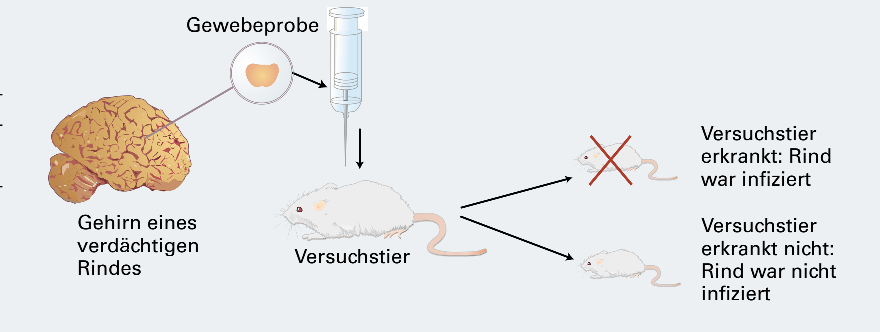
In den USA wird noch die etwas umständliche Methode angewandt, Gewebeproben von verdächtigen geschlachteten Rindern mit Antikörpern gegen Prionen zu versetzen und nach einigen Tagen jede einzelne Probe unter dem Mikroskop zu prüfen (siehe Kasten S. 66). Das Verfahren ist zwar recht zuverlässig, jedoch langsam und für Massenuntersuchungen zu aufwändig.

Auf der Suche nach schnelleren, leistungsstärkeren Prüfmethoden entwickel- ▷

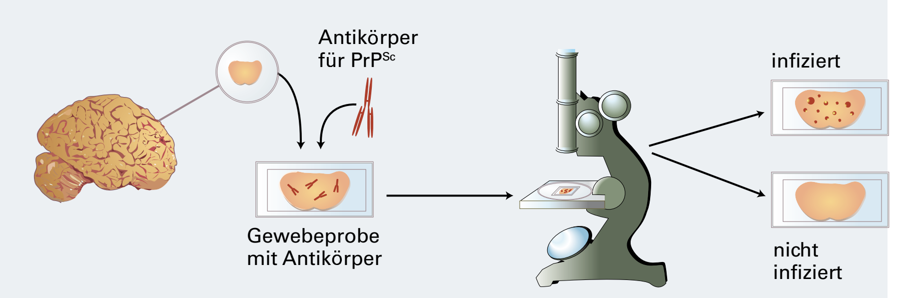
Tests zum Prionennachweis

Früher dauerte ein BSE-Test mindestens einige Monate – bis ein künstlich infiziertes Versuchstier erkrankte. Bald kamen schnellere Immuntests hinzu. Die heutigen Schnelltests liefern binnen Stunden ein Ergebnis (in der EU waren Ende 2004 fünf solche Verfahren zugelassen). Jetzt ist das Bestreben, die Empfindlichkeit für Prionen zu steigern, damit auch Diagnosen an infizierten, noch gesunden Rindern möglich werden, idealerweise am lebenden Tier durch Blut oder gegebenenfalls Urin.

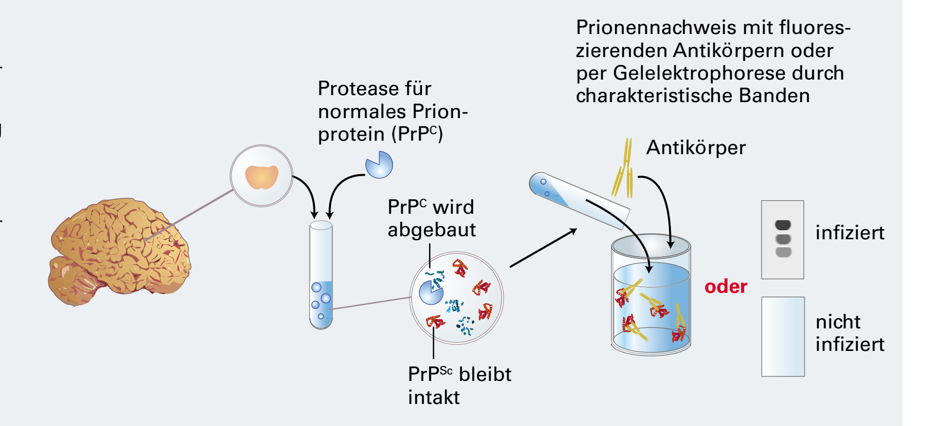
Labortiere als Testobjekte
langwierig und teuer;
verrät anhand der Dauer, bis das Versuchstier erkrankt, wie infektiös die Gewebeprobe war;
Versuch kann verschiedene Prionenstämme erkennen lassen



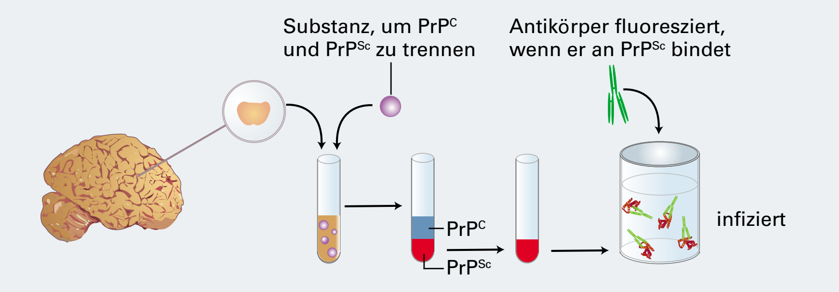
Immuntests an Gewebeproben
erster spezifischer Test zum Prionennachweis, an dem sich die neueren Methoden messen müssen;
die Einzelprüfung der Präparate ist zeitaufwändig;
nicht für lückenlose Reihenuntersuchungen geeignet



gebräuchliche Immunschnelltests
von verschiedenen Firmen als automatisierte Tests angeboten;
geeignet zur gleichzeitigen Untersuchung Hunderter von Proben;
Ergebnis binnen acht Stunden;
nur bei hohen Prionenkonzentration geeignet



CDI – auf die Molekülstruktur zielender Immunschnelltest
sehr empfindlicher automatisierter Test;
Ergebnis binnen fünf Stunden;
zeigt die Prionenmenge in der Probe an, ohne dass vorher normale Prionproteine entfernt werden müssen (was auch manche Prionen trifft) – daher zuverlässiger;
zurzeit auch an Gewebeproben lebender Tiere untersucht;
möglicherweise für Bluttests geeignet



LUCY READING

▷ ten Forscher in meinem und anderen Labors Mitte der 1980er Jahre neue Antikörper, die Prionen erkennen. Weil diese Antikörper allerdings auch mit normalem Prionprotein reagieren, muss Letzteres vor dem Test aus der Probe komplett verschwinden. Man setzt zu dem Zweck eine Protease zu, ein Enzym, das Proteine zerlegt. Da das krankmachende PrP^{Sc} solchen Enzymen gegenüber oft gefeit ist, bleibt es allein übrig. Mit den Antikörpern bestimmt man dann die übrig gebliebene Prionenmenge.

Drei bis fünf Jahre bis zum Ausbruch der Krankheit

Für dieses Verfahren bieten mehrere Firmen eigene Antikörper und Testsets an, darunter Prionics in der Schweiz und Bio-Rad in Frankreich. Das Ergebnis erhält man schon nach ein paar Stunden. In Europa und Japan werden diese schnellen, recht einfach handhabbaren Tests heute verbreitet eingesetzt.

Doch diese Art Schnelltest hat ihre Grenzen. Ein positiver Nachweis gelingt nur, wenn das Gehirn des Tiers schon eine Menge PrP^{Sc} aufweist. Vieh wird oft mit zwei Jahren oder jünger geschlachtet. Bis sich BSE manifestiert, können nach der Infektion aber leicht drei bis fünf Jahre verstreichen. Tiere mit geringen Prionenmengen, also auch junge infizierte Rinder, würden bei solchen Tests nicht auffallen.

Um geringere Prionenmengen als bisher nachweisen zu können, gibt es mehrere neue Ansätze. Einer davon zielt darauf, die Menge abartiger Prionen in der Probe, idealerweise sogar in einer Blutprobe, künstlich zu erhöhen – ein Ansatz, den ein Team um Claudio Soto bei Serono Pharmaceuticals entwickelt. In den Studien vermengten die Forscher Hirnpräparate von normalen und scrapieinfizierten Hamstern. Die Mischung behandelten sie mit Schallpulsen. Dadurch sollte sich das verklumpte infektiöse PrP^{Sc} auflösen und nun gesunde Schwestermoleküle aus dem nicht infizierten Gehirn in die schädliche Form zwingen. Tatsächlich stieg die PrP^{Sc}-Menge in den Proben auf das Zehnfache. Ähnliche Ergebnisse erzielte Surachai Supattapone von der Dartmouth Medical School in Hanover (New Hampshire).

Ein weiterer Ansatz zielt auf die abnorme Gestalt – englisch *conformation* – der Prionen (siehe Kasten links, ganz unten). Und zwar entwickelten Jiri Safar und ich an der Universität von Kalifornien in San Francisco einen Test, bei dem bestimmte Antikörper nur normale, andere nur krankhaft gestaltete Moleküle erkennen. Die Antikörper binden sich an eine Stelle des Prions beziehungsweise Prionproteins, die in der jeweils anderen Version verdeckt ist. Dadurch entfällt die Vorbehandlung mit Proteasen. Wie wir heute wissen, kommen Prionen nämlich durchaus auch in einer für das Enzym angreifbaren Form vor. Unter Umständen entfernen die Proteasen also auch einen Großteil, vielleicht bis zu 90 Prozent, des PrP^{Sc}. Die Belastung der Probe wäre dann wesentlich höher als der Test anzeigt.

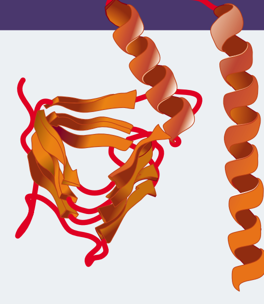
In Europa ist der CDI-Test (*conformation-dependent immunoassay*) seit 2003 zugelassen. Auch er könnte für Blutuntersuchungen empfindlich genug sein. Im Herbst 2003 wurde er in Japan angewandt – im Falle eines erst 23 Monate alten Rindes. Äußerlich wirkte die junge Kuh noch neurologisch gesund. Zwei kommerzielle BSE-Tests ergaben dennoch unklare Resultate. Der CDI-Test wies dann abnorme Prionen im Hirnstamm nach.

Zur gleichen Zeit diagnostizierten die Japaner bei einer weiteren symptomfreien jungen Kuh BSE. Dieses Tier war erst 21 Monate alt. In Europa wären diese Fälle schon deswegen unentdeckt geblieben, weil BSE-Tests an für den menschlichen Verzehr vorgesehenen Schlachtrindern in Deutschland erst ab dem Alter von 24 Monaten, EU-weit ab dreißig Monaten vorgeschrieben sind. Die japanische Regierung hatte zunächst vor, die europäischen Richtlinien zu übernehmen, ließ sich aber unter dem Druck von Verbraucherschützern dazu bewegen, jedes einzelne geschlachtete Tier, auch jüngere, zu testen.

Zurzeit wird in Deutschland diskutiert, die Altersgrenze für BSE-Tests bei Schlachtvieh gemäß den geltenden EU-Richtlinien auf dreißig Monate anzuheben, weil jüngere Tiere nach aller Logik seit dem Verfütterungsverbot von Tiermehl nicht mehr infiziert sein können. In den USA wurden in den vergangenen Jahren von offensichtlich krankem Schlachtvieh nur Stichproben auf BSE getestet. Dort laufen erst jetzt umfangreichere Untersuchungen an.

Angesichts der Situation wie auch unseres Wissensstands halte ich die Untersuchung jedes einzelnen Schlachtrinds mit möglichst empfindlichen Tests für die einzig vernünftige Lösung. Schnellere und sensiblere Methoden sollten das ▷

Jenseits der Viren



Wer Prionen ähnlich wie manche Viren bewertet, unterschätzt ihre Eigenschaften und ihr Gefahrenpotenzial. Zwar sind sie übertragbar und Prionenkrankheiten damit ansteckend. Doch treten Prionen offenbar immer wieder spontan und unvermutet auf. Vor Viren kann man sich beispielsweise durch strenge Quarantäne schützen – vor Prionen nicht unbedingt. Im Prinzip kann jedes Säugetier, der Mensch eingeschlossen, irgendwann ohne ersichtlichen Grund solche abnorm gefalteten Eiweißstoffe bilden.

Jährlich erkrankt einer von einer Million Menschen wahrscheinlich durch eine Spontanmutation an der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit. Mutmaßlich ging die Kuru-Epidemie bei den Fore auf Neuguinea im 20. Jahrhundert auf solch eine spontane Hirnerkrankung eines Stammesmitglieds zurück – und wurde durch das rituelle Verspeisen von Gehirnen Verstorbener weitergegeben.

Wir wissen nicht, ob die jüngsten BSE-Fälle in Nordamerika ebenfalls ein spontanes Auftreten von Prionen bei diesen Rindern zur Ursache hatten. Zweifellos ging die fast schon weltweite BSE-Epidemie von Großbritannien aus, und in diesen Fällen wurde die Krankheit tatsächlich auf Grund unseres Unwissens weitergegeben. Doch selbst ohne solche Kontakte können wahrscheinlich, wenn auch vereinzelt, immer wieder BSE-Tiere auftauchen. Ich kann mir vorstellen, dass das seit Menschengedenken geschieht, nur bisher weniger beachtet wurde.

Prionenkrankheiten lassen sich nie völlig ausrotten, weil sie jederzeit neu erscheinen können. Wir müssen weiter denken – vor Prionen sollten wir uns auch zukünftig in Acht nehmen.

▷ demnächst möglich machen. Man mag argwöhnen, dass ich den lückenlosen CDI-Test aus Eigeninteresse propagiere. Eine andere Möglichkeit als hochempfindliche Schnelltests, um dem Verbraucher Sicherheit zu gewähren, sehe ich allerdings nicht.

Als wir den CDI-Test entwickelten, entdeckten wir zu unserer Überraschung, dass wir es genau genommen nicht mit einer Sorte von »abnormem Prion« zu tun haben, sondern mit unterschiedlichen Abarten. Sie sind gegenüber den Proteine zerschneidenden Proteasen verschieden empfindlich. Lange bevor die enzymatisch unangreifbaren Formen des Scrapie-Prions auftreten, erscheinen verletzbare Versionen.

Ob diese aber Zwischenstufen darstellen, aus denen letztlich die resistenten, robusten Prionen hervorgehen, ist noch unklar. In jedem Fall würde ein Test wie CDI, der empfindliches PrP^{Sc} erkennt – bei dem es also nicht zwangsläufig zusammen mit normalem Prionprotein entfernt wird –, eine Infektion anzeigen können, lange bevor die ersten Krankheitssymptome auftreten.

Vor allem auch könnte man mit Bluttests beim Menschen Infektionen zeitig genug erkennen, um mit Therapien, die sich bereits ankündigen, das Schlimmste zu verhüten. Mit dem CDI-Test gelang uns im Blut von Nagetieren und auch von Menschen bereits der Nachweis geringer Mengen solcher verletzlicher PrP^{Sc}-Prionen. Vorläufige Ergebnisse, dass auch Urin abnorme Prionen enthalten kann, haben sich nicht bestätigt.

Neu ist die Erkenntnis, dass Prionen in Muskeln vorkommen. Patrick Bosque vom Zentrum für Gesundheitswissenschaften der Universität von Colorado in Denver und ich fanden sie in der Hinterbeinmuskulatur von Mäusen hunderttausendmal höher konzentriert als im Blut. Wir wiesen sie auch in anderen Muskelgruppen der Nager nach, allerdings dort deutlich weniger. Dagegen entdeckten Michael Beekes und Mitarbeiter am Robert Koch-Institut in Berlin, die Hamster mit Prionen gefüttert hatten, dass die deformierten Proteine in allen Muskeln und dort überall in größerer Menge vorkamen. Den Grund für die unterschiedlichen Befunde wissen wir nicht.

Erste Behandlungsversuche bei Prionenkranken

Auch manche Creutzfeldt-Jakob-Patienten weisen in Muskeln PrP^{Sc} auf, so zeigten Safar und DeArmond. Adriano Aguzzi von der Universität Zürich und seine Mitarbeiter entdeckten die fatalen Moleküle in Muskelgewebe jeder vierten von ihnen untersuchten kranken Person.

Ebenso dringlich wie bessere und frühere Diagnosemethoden wäre, die Vermehrung der gefährlichen Prionen im Körper von vornherein zu verhindern oder wenigstens befallene Zellen darin zu unterstützen, die deformierten Moleküle effektiver zu beseitigen. Bisher kennt die Forschung mehr als zwanzig

Die Vielfalt der Prionen

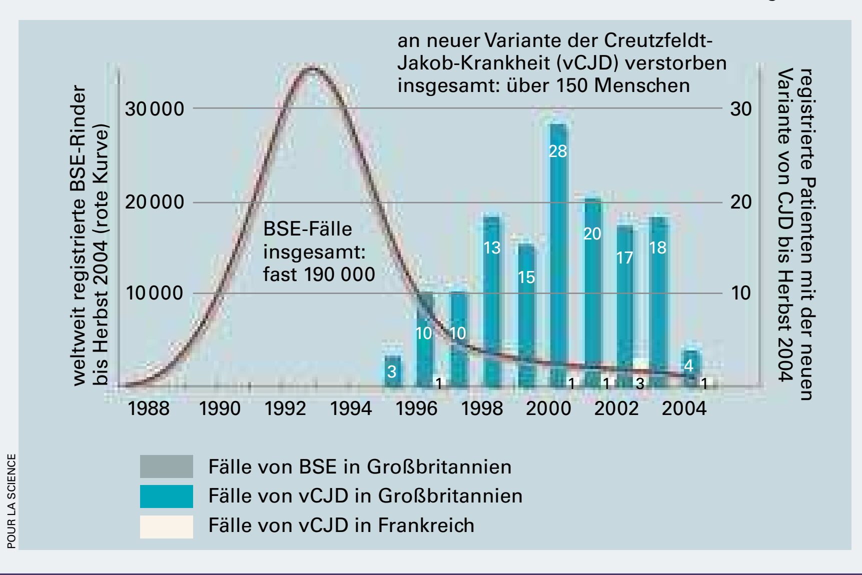
Prionen treten in einer Vielzahl von Formen auf, regelrechten Stämmen, die sich in Struktur und Eigenschaften unterscheiden. Genauer wissen die Forscher allerdings nur, dass die Stämme unterschiedliche Krankheiten auslösen. Beim Menschen gehen die Creutzfeldt-Jakob-Krankheit, Kuru, die familiär bedingte tödliche Insomnie und das Gerstmann-Sträußler-Scheinker-Syndrom jeweils auf unterschiedliche Prionenvarianten zurück. Von der Traberkrankheit der Schafe sind zwanzig verschiedene Formen bekannt. Auch BSE kommt möglicherweise in mehreren Varianten vor. So fand sich bei einer 23 Monate alten Kuh aus Japan und einer aus der Slowakei ein ungewöhnliches Scrapie-Prion, das in großer Menge nicht wie gewöhnlich im Hirnstamm, sondern im Mittelhirn vorkam.

Wie wichtig die Unterscheidung der Prionenstämme ist, erweisen Studien an Schafen. Eine Schafrasse (der ARR/ARR-Genotyp) ist gegen Scrapie gefeit. Deswegen züchten manche Länder diese Rasse nun bevorzugt. Allerdings erkranken diese Tiere, wenn man sie mit BSE-Prionen behandelt. Die Gefahr besteht, dass hier ein neuer Herd der für den Menschen gefährlichen Erreger entstünde. Scrapie ist für uns offenbar nicht ansteckend. Mit den neuen Prionen befallene Schafe könnten es sein.

BSE und die Folgen

Zu spät erkannten die britischen Behörden, dass der Erreger des Rinderwahnsinns auch für Menschen tödlich sein kann. Erst nach dem Höhepunkt der Epidemie, die in den 1980er Jahren in Großbritannien ausbrach, starben Menschen an einer neuen Variante der Creutzfeldt-Jakob-Krankheit. Fast alle Länder Westeuropas verzeichnen inzwischen BSE-Fälle, außer Deutschland sind unter anderem Frankreich, die Schweiz, Portugal und Spanien besonders betroffen.

Deutschland registrierte im Jahr 2004 noch über 60 BSE-Rinder. Im Jahr 2001, kurz nach Aufdeckung der ersten Fälle, waren es 125. Experten erwarten für 2005 einen weiteren deutlichen Rückgang. Insgesamt wurden in Deutschland bisher fast 360 BSE-Rinder bestätigt.



Substanzen, die solches zumindest in der Zellkultur leisten. Mehrere Stoffe zeigten auch bei infizierten Tieren Wirkung: Damit behandelte Mäuse und Hamster überlebten länger. Allerdings musste der Wirkstoff etwa zeitgleich mit den Prionen verabreicht werden. Später nützte er nichts mehr. Viele der bisher geprüften Substanzen funktionieren jedoch nur in so hohen Dosen, dass die Nebenwirkungen für den Einsatz beim Menschen wohl nicht tragbar wären.

Eine Hürde ist die für Medikamente oft schwer passierbare Blut-Hirn-Schranke. In der Zellkultur unterdrückt Chlorpromazin (Megaphen), ein älterer Wirkstoff gegen Schizophrenie, die Prionenbildung. Gleiches gilt für einige andere Substanzen, die im Gehirn aktiv sind. Das erkannten Carsten Korth von der Universität Düsseldorf und ich sowie, unabhängig voneinander, Katsumi Dohura von der Kyushu-Universität in Hakozaki (Japan) und Byron Caughey vom amerikanischen Nationalen Institut für Allergien und Infektionskrankheiten in Bethesda (Maryland).

Noch etwa zehnmal wirkungsvoller als Chlorpromazin ist das Malariamittel Quinacrin, das eine ähnliche Struktur hat. Dieses verabreichten wir Mäusen sechzig Tage, nachdem wir ihnen Prionen ins Gehirn gespritzt hatten. Das Quinacrin verlängerte die Phase, bis die ersten Krankheitszeichen auftraten, um fast ein Fünftel. Um es beim Menschen einzusetzen, müsste man allerdings erreichen, dass Patienten die erforderlichen hohen Dosierungen verkraften. Alternativ könnte man danach streben, die Wirksamkeit der Substanz zu erhöhen. Daran arbeiten Barnaby May und Fred E. Cohen von der Universität von Kalifornien in San Francisco. In der Zellkultur konnten sie dessen Effektivität durch Aneinanderkoppeln von jeweils zwei Quinacrin-Molekülen um das Zehnfache steigern.

Bei einem anderen therapeutischen Ansatz versuchen mehrere Forscherteams, in kultivierten Zellen die Bildung der Prionen mit Antikörpern gegen PrP^{Sc} zu hemmen – bereits mit einigem Erfolg. Auch Mäuse, die Prionen über den Verdauungstrakt aufgenommen hatten und mit entsprechenden Antikörpern behandelten wurden, erkrankten später als Kontrolltiere.

Mit menschlichen Patienten gibt es für das alles noch nicht viel Erfahrung. Einige Betroffene erhalten Quinacrin – Personen mit allen Formen von CJD. Geheilt wurde bisher niemand. Doch finden sich Anzeichen, dass die Krankheit zumindest langsamer fortschreitet. Auch gibt es erste ärztliche Versuche gegen die neue Variante von CJD mit Pentosanpolysulfat, einem Mittel gegen Blasenleiden. Weil der Wirkstoff die Blut-Hirn-Schranke wegen seiner zahlreichen elektrischen Ladungen höchstwahrscheinlich nicht passieren kann, injiziert man ihn direkt in einen Gehirnventrikel. Bei einem jungen Mann scheint die Substanz bewirkt zu haben, dass die Symptome nicht mehr so rasant zunehmen. Jedoch kann sich das Medikament vermutlich nicht gut im Gehirn verteilen. Zumindest ist das von anderen Molekülen mit ähnlichen Ladungsverhältnissen bekannt.

Auch wenn der Weg bis zu einer Therapie von Prionenkrankheiten noch weit ist, so haben doch die letzten fünf Jahre die Forschung um einiges weiter gebracht. Sobald es einmal eine effektive Behandlung der Gehirnzersetzung geben wird, steht zu hoffen, dass die Mediziner hierdurch auch herausfinden, wie sie andere, viel häufigere neurodegenerative Erkrankungen behandeln können – wie Alzheimer, Parkinson oder die amyotrophe Lateralsklerose. Bei ihnen allen bilden falsch geformte Proteine unerwünschte Verklumpungen. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Stanley B. Prusiner hat an der Universität von Kalifornien in San Francisco eine Professor für Neurologie und Biochemie. Für die Entdeckung der Prionen gewann er 1997 den Nobelpreis für Physiologie oder Medizin.

Prionen und Prionenkrankheiten. Von Beat Hörnlimann et al. Gruyter, 2001

Prion biology and diseases. Von Stanley B. Prusiner (Hg.). Cold Spring Harbor Laboratory Press, 2004 (2. Aufl.)

Advancing prion science: Guidance for the national prion research program. Von R. Erdtmann und L. B. Sivitz (Hg.). National Academy Press, 2004

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Molekulares Spiegelkabinett

Auch im Reich der Moleküle kann es wichtig sein, zwischen links und rechts zu unterscheiden. Bei der jüngsten Chemie-Olympiade mussten Schüler zeigen, wie gut ihnen das gelingt.

Von Reinhard Demuth und Oliver Reiser

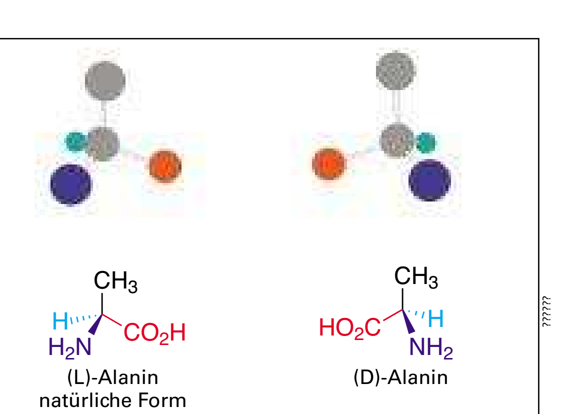
Noch bevor in der zweiten Augusthälfte letzten Jahres die Athleten der Welt in Athen um Medaillen kämpften, maßen Ende Juli in Kiel junge Geistesakrobaten in einem ähnlich ambitionierten Wettstreit ihr Können: der 36. Internationalen Chemie-Olympiade. Nach 15 Jahren fand die renommierte Veranstaltung wieder einmal in Deutschland statt. 240 Schüler aus 61 Ländern traten gegeneinander an, weitere sieben Staaten waren mit Beobachtern vertreten – eine Rekordbeteiligung.

Wie echte Olympioniken hatten auch die Teilnehmer dieses Wettbewerbs eine Qualifikation zu überstehen. In Deutschland beteiligten sich immerhin rund 400 Schüler zwischen 16 und 19 Jahren an der ersten von insgesamt vier Ausscheidungsrunden, die im Mai 2003 stattfand – in China waren es über eine Million. Zur Olympiade durften schließlich aus jedem Land maximal vier Bewerber antreten. Die deutschen Teilnehmer rechtfertigten ihre Fahrkarte nach Kiel mit einem glänzenden Abschneiden: Zwei errangen je eine Gold-, die beiden anderen eine Silbermedaille. Die Chinesen gewannen allerdings gleich viermal Gold.

Überhaupt bewiesen die asiatischen und osteuropäischen Länder eine erdrückende Überlegenheit: Sie sicherten sich 25 der 30 Goldmedaillen. Unter den westlichen Industrienationen erreichte Deutschland klar den Spitzenplatz; je eine weitere Goldmedaille ging hier nur an Österreich, Kanada und Australien.

Die Ergebnisse der viel diskutierten Pisa-Studien wurden teilweise auf den Kopf gestellt. So errang Finnland nur zwei Bronzemedaillen. Zumindest in Chemie scheint das dortige Schulsystem also keine Spitzenleistungen zu fördern.

Insgesamt galt es zehn Aufgaben zu bewältigen: acht in der theoretischen und zwei in der praktischen Klausur. Alle waren von einer eigens dafür eingesetzten Kommission so konzipiert, dass sie jeweils einen interessanten Bezug zu aktuellen Forschungsthemen aufwiesen. Zugleich sollten sie die interdisziplinäre Rolle der Chemie aufzeigen und ihre Bedeutung für neue Errungenschaften in anderen Fächern veranschaulichen. Einige hatten auch eine spezielle Verbindung mit dem Gastgeberland Deutschland und der Universität Kiel; so ging es um das Element Germanium und einen in Kiel entdeckten wichtigen Reaktionstyp: die Diels-Alder-Reaktion.



Auch Moleküle können händig sein. Meist ist die Ursache ein »asymmetrisches Kohlenstoffatom« – also eines, an dem vier verschiedene Atome oder Atomgruppen hängen. Als Beispiel ist hier die Aminosäure Alanin gezeigt – oben in räumlicher Projektion, unten in der bei Chemikern üblichen Darstellungsweise. Nur die linkshändige Form kommt in der Natur vor.

Jede Aufgabe bestand aus mehreren Teilen mit unterschiedlichem Schwierigkeitsgrad, wobei die leichtesten auch ohne allzu großes chemisches Vorwissen lösbar waren. Hier wollen wir eine kleine Auswahl vorstellen, an der interessierte Leser – Schüler, Erwachsene mit dunklen Erinnerungen an den Chemie-Unterricht, aber auch völlige Laien mit einer gewissen Neugier auf das Fach – ihre Olympiareife testen können. Die Fragen stammen alle aus einer Aufgabe der theoretischen Klausur, die sich um die Rechts-links-Asymmetrie bei Molekülen drehte.

Linke und rechte Hand

Wenn Sie Ihre rechte Hand vor den Spiegel halten, sehen Sie eine linke Hand. In diesem Fall kommt also beides in der Natur vor: Bild und Spiegelbild. Bei vielen anderen Dingen gilt das aber nicht. Ein schönes Beispiel sind Weinbergschnecken. Ihr Gehäuse hat fast immer die Form einer rechtsgängigen Spirale, nur bei einem unter 20000 Exemplaren windet sich die Spirale links herum. Dagegen wächst der Hopfen – selbst im konservativen Bayern – stets in einer linksgängigen Helix.

Auch im Reich der Moleküle gibt es – vor allem unter den biologisch wichtigen Stoffen – viele, bei denen sich Bild und Spiegelbild unterscheiden. Nur eine der beiden Formen tritt dann in der Natur auf. So bildet die DNA unserer Erbsubstanz stets eine rechtsgängige Helix. Ebenfalls rechtshändig sind die Zuckermoleküle, aus denen natürlich vorkommende Kohlenhydrate bestehen. Dagegen bauen sich Proteine und Enzyme im Körper aus linkshändigen Aminosäuren auf.

Von großer Bedeutung für die Medizin ist, dass Bild und Spiegelbild bei Mo-





Händigkeit ist in der Natur ein verbreitetes Phänomen. Zum Beispiel wächst der Hopfen stets in einer linksgängigen Helix, und die Gehäuse der Weinbergschnecken winden sich ganz überwiegend rechtsherum.

lekülen oft eine völlig andere biologische Wirkung haben. Was ein Stoff im Körper bewirkt, hängt nämlich davon ab, ob und wie gut er sich an spezielle »Rezeptoren« auf bestimmten Zellen anlagern kann. Solche Rezeptoren fungieren wie Schlösser, die sich nur von speziell geformten Schlüsseln aufschließen lassen. Dabei unterscheiden sie in der Regel zwischen Bild und Spiegelbild. Ähnlich wie die rechte Hand nur in einen rechten Handschuh passt, akzeptiert auch ein Rezeptor meist ausschließlich eine der beiden spiegelbildlichen Formen. Die andere bleibt dann wirkungslos oder kann in ungünstigen Fällen – weil sie sich im Schloss verkantet oder ein falsches Schloss öffnet – sogar schädlich sein.

Ein besonders tragisches Beispiel dafür war das Beruhigungs- und Schlafmittel Contergan. Ende der 1950er Jahre wurde es in einer für ein Medikament beispiellosen Werbekampagne als vollkommen sicher und nebenwirkungsfrei angepriesen. Deshalb nahmen es auch schwangere Frauen gegen die Morgenübelkeit. Contergan zählt jedoch zu den Molekülen, die in zwei spiegelbildlichen Formen vorkommen. Beide fielen bei seiner chemischen Synthese in gleicher Menge an und lagen in dem Arzneimittel folglich als Gemisch vor. Wie sich später herausstellte, wirkt jedoch nur die eine Form als harmloses Schlafmittel, während die andere bei ungeborenen Föten schwere Missbildungen verursacht. Dadurch kamen zwischen 1958 und 1962 etwa 10000 Kinder mit verkürzten Gliedmaßen zur Welt.

Bei der Chemie-Olympiade ging es um einen Wirkstoff mit besonderem Bezug zum Sport: die Droge Pseudoephedrin, die bis 2003 auf der Dopingliste stand. Sie kommt in Grippe- und Allergiemitteln vor, die in vielen Ländern rezeptfrei erhältlich sind und sogar für Kleinkinder empfohlen werden.

Bei der Olympiade 2000 wurde dies der damals 16-jährigen Rumänin Andrea Raducan zum Verhängnis. Ihr Mannschaftsarzt verabreichte ihr am Abend vor dem Wettkampf wegen einer leichten Erkältung ein Grippemittel, das die Substanz enthielt. Da die Dopingkontrolle daraufhin ein positives Ergebnis lieferte, musste die Turnerin die am nächsten Tag gewonnene Goldmedaille zurückgeben.

Asymmetrischer Kohlenstoff

Hohe rumänische Sportfunktionäre traten aus Protest zurück, der Mannschaftsarzt erhielt ein Berufsverbot, und Andrea Raducan drohte eine lebenslange Sperre. Im Jahre 2003 wurde Pseudoephedrin dann zwar von der Dopingliste gestrichen, doch trotz überwältigender öffentlicher Unterstützung für die rumänische Turnerin hat die Disqualifikation bis heute Bestand. Man sieht an diesem Beispiel, dass chemischer Sachverstand in vielen Bereichen der Gesellschaft vonnöten ist, um so unsinnige Entscheidungen und ihre weit reichenden Folgen von vornherein zu verhindern.

Bevor wir nun mit den Fragen beginnen, möchten wir ein paar grundlegende Fakten in Erinnerung rufen. Wenn von einem Molekül spiegelbildliche Formen existieren, nennen es die Chemiker händig oder chiral (nach griechisch *cheir*, Hand). Die häufigste Klasse chiraler Verbindungen sind solche mit einem Kohlenstoffatom, an dem vier verschiedene Atome oder Gruppen von Atomen hängen. Chemiker sprechen in diesem Fall von einem asymmetrischen Kohlenstoffatom, weil es bewirkt, dass das betreffende Molekül keinerlei Symmetrie aufweist. Da die Gruppen tetraedrisch um dieses Kohlenstoffatom angeordnet sind, gibt es in diesem Fall zwei spiegelbildliche Formen, die sich nicht zur Deckung bringen lassen. Um von der einen zur anderen zu gelangen, muss man jeweils zwei Gruppen vertauschen – was nur durch Brechen und Neuknüpfen von chemischen Bindungen möglich ist.

Als dreidimensionaler Körper lässt sich ein Tetraeder nicht wirklichkeitsgetreu auf der zweidimensionalen Papierebene darstellen, sondern nur projizieren. Chemiker machen das gerne so, dass sie zwei der vier Bindungen in die Zeichenfläche legen. Dann ragt die dritte nach oben und die vierte nach unten aus der Papierebene heraus. Um das anzudeuten, zeichnen Chemiker die nach oben weisende Bindung als ausgefüllten und die nach unten zeigende als gestrichelten Keil. Als einfaches Beispiel einer chiralen Verbindung ist die Aminosäure Alanin in ihren beiden spiegelbildlichen Formen gezeichnet – einmal in perspektivischer Darstellung und einmal in der gerade geschilderten Projektion (Bild links).

Pseudoephedrin hat natürlich eine etwas kompliziertere Formel. Ihre Darstellung ist deshalb der Übersichtlichkeit halber gegenüber der des Alanins noch etwas vereinfacht. So wurden die meisten ▷

▷ Wasserstoffatome samt den zugehörigen Bindungen weggelassen. Außerdem sind nur wenige Kohlenstoffatome explizit eingezeichnet. Die anderen befinden sich jeweils dort, wo mehrere Bindungsstriche aufeinander treffen. Zwei parallele Bindungsstriche stehen jeweils für eine Doppelbindung. Drei solche Doppelbindungen kommen (formal) in dem sechseckigen Benzolring links in der Formel vor.

Die kompliziertere Struktur von Pseudoephedrin hat auch zur Folge, dass das Molekül nicht nur ein asymmetrisches Kohlenstoffatom enthält, sondern gleich mehrere. Damit sind wir schon bei der **ersten Frage**: Wie viele asymmetrische Kohlenstoffatome kommen in Pseudoephedrin vor und wo stecken sie? Kleiner Hinweis: Ein Kohlenstoffatom, das mit einem anderen über eine Doppelbindung verknüpft ist, kann nicht asymmetrisch sein, weil es nur drei Bindungspartner hat, die einen Mercedesstern bilden, der mit seinem Spiegelbild identisch ist.

Die **zweite Frage** gilt einer einfachen Reaktion mit Pseudoephedrin. Behandelt man die Droge unter milden Bedingungen mit einer sauren Permanganatlösung, entsteht das Anregungsmittel Methcathinon. Es ist mit dem Cathinon verwandt, dem Wirkstoff der vor allem von jemenitischen Männern gekauten Kath-Pflanze. Können Sie die komplette Gleichung für diese Reaktion aufschreiben?

Die Frage klingt zunächst vielleicht komplizierter, als sie ist. Hier ein kleiner Tipp: Erinnern Sie sich noch, welche Substanzklasse durch die Endung -on gekennzeichnet wird? Wem das nicht reicht, dem sei gesagt, dass Pseudoephedrin bei der schonenden Oxidation mit Permanganat nur zwei Wasserstoffatome verliert.

Die **dritte Frage** ist mehrteilig und deutlich schwerer als die ersten beiden, ja eine echte Herausforderung. Behandelt man Methcathinon mit Lithiumaluminiumhydrid, entsteht eine Verbindung mit derselben chemischen Zusammensetzung wie Pseudoephedrin, aber einem anderen Schmelzpunkt. Um welches Molekül handelt es sich? Wodurch unterscheidet es sich von Pseudoephedrin? Wie sieht seine genaue räumliche Struktur aus? Können Sie erklären, warum bei der Reaktion ein Molekül mit genau dieser räumlichen Struktur entsteht und kein anderes?

Bevor Sie gleich das Handtuch werfen, sei verraten, dass Lithiumaluminiumhydrid ein Reduktionsmittel ist, das die oxidierende Wirkung des Permanganats praktisch rückgängig macht, indem es die beiden abgetrennten Wasserstoffatome wieder anfügt. Allerdings entsteht trotzdem nicht genau das ursprüngliche Molekül, wie der andere Schmelzpunkt beweist. Woran kann das liegen? Bei der Antwort spielt ein Effekt eine Rolle, den Chemiker als sterische Behinderung bezeichnen: Wenn sich ein Reaktionspartner prinzipiell von zwei Seiten seinem Zielmolekül nähern kann, bevorzugt er in der Regel die Seite, auf der er ungehinderten Zugang hat.

Die **vierte und letzte Frage** ist wieder einfacher, auch wenn Sie zur Beantwortung vorher noch ein paar Begriffe lernen müssen. Es geht dabei um die räumliche Beziehung zwischen Pseudoephedrin und dem Ergebnis der zuletzt genannten Reaktion, bei dem es sich übrigens um das Ephedrin handelt. Sind die beiden Moleküle Stereoisomere, Enantiomere, Diastereomere oder Konformationsisomere?

Das klingt furchtbar kompliziert, ist es aber nicht, wenn man die Bedeutung der Begriffe kennt. Deshalb seien sie der Reihe nach erklärt. Als Isomere bezeichnen Chemiker Verbindungen, in denen dieselben Atome in denselben Mengenverhältnissen vorliegen, aber unterschiedlich angeordnet sind. Als Beispiel können Ethanol ($CH_3–CH_2–OH$) und Dimethylether ($CH_3–O–CH_3$) gelten. Bei Stereoisomeren stimmen zusätzlich die Bindungsverhältnisse überein – die gleichen Atome sind jeweils gleichartig miteinander verknüpft; aber die dreidimensionale Anordnung ist trotzdem verschieden. Das trifft beispielsweise auf chirale Verbindungen zu. Ein Spezialfall von Stereoisomeren sind denn auch Moleküle, die sich wie Bild und Spiegelbild zueinander verhalten. Chemiker bezeichnen sie als Enantiomere. Diastereomere sind dagegen all jene Stereoisomere, bei denen es sich nicht um Enantiomere handelt. Unter Konformationsisomeren schließlich verstehen Chemiker Moleküle, die sich durch Drehung eines Molekülteils um eine Einfachbindung ineinander umwandeln lassen.

Wer diese Begriffe bisher nicht gekannt hat, braucht sicher eine gewisse Zeit, um sich damit vertraut zu machen. Die Beschäftigung mit der vierten Frage bietet eine gute Gelegenheit dafür.

Reif für Olympia?

Ein besonderer Reiz der vier Fragen ist, dass sie teils aufeinander aufbauen. Das hat allerdings auch eine negative Kehrseite: Wer an einer Aufgabe scheitert, kann die nächste auch nicht meistern. In diesem Fall sollten Sie nicht zögern, selektiv die Antwort nachzulesen, die für die betreffende Frage benötigt wird. Alle Auflösungen stehen in dem Kasten auf der rechten Seite.

Nachdem Sie ermittelt haben, wie viele Fragen Sie korrekt beantworten konnten, möchten Sie Ihr Abschneiden sicher mit dem der echten Olympioniken vergleichen. Von diesen schafften es neunzig Prozent, die asymmetrischen Kohlenstoffatome im Pseudoephedrin zu identifizieren. An der Gleichung für die Reaktion mit Permanganat scheiterten dagegen bereits fünfzig Prozent (allerdings musste bei der echten Olympiade auch noch angegeben werden, bei welchen Elementen sich die Oxidationsstufe in welcher Weise ändert). Nur zehn Prozent konnten schließlich sowohl die dritte als auch die vierte Frage völlig richtig beantworten, während ein Viertel hier immerhin sechs der möglichen sieben Punkte erzielte.

Wie schon aus der tragischen Contergan-Geschichte hervorgeht, hat die Rechts-links-Asymmetrie in der chemisch-pharmazeutischen Industrie enorme Bedeutung. Heutige Arzneimittel enthalten in aller Regel nur noch den chiralen Wirkstoff selbst und nicht zusätzlich sein Spiegelbild. Herkömmliche chemische Synthesen aber liefern immer ein Gemisch aus beiden, sodass die uner-

?????

Die Droge Pseudoephedrin kommt in vielen Grippemitteln vor und galt bis 2003 als Dopingmittel. Das hier gezeigte D-Pseudoephedrin hat leicht anregende Wirkung. Sein Spiegelbild wirkt etwa sechsmal schwächer. Erkennen Sie, wie viele asymmetrische Kohlenstoffatome das Molekül enthält und wo sich diese befinden?

Lösungen

Zu Frage 1:
Pseudoephedrin enthält zwei asymmetrische Kohlenstoffatome, die hier mit blauen Sternchen markiert sind.

Zu Frage 2:
Bei der Reaktion von Pseudoephedrin mit Permanganat zu Methcathinon entsteht aus dem Alkohol durch Entfernen von zwei Wasserstoffatomen ein Keton. Der Wasserstoff wird auf Sauerstoffatome des Permanganats übertragen und ergibt letztlich Wassermoleküle. Das Mangan liegt am Ende als zweifach positiv geladenes Ion vor.

5 Pseudoephedrin + 2 MnO_4^- + 6 H^+ → 5 Methcathinon + 2 Mn^{2+} + 8 H_2O

Zu Frage 3:
Die Reduktion des Methcathinons beginnt damit, dass sich ein Hydrid-Ion (H^-) vom Lithiumaluminiumhydrid an das Kohlenstoffatom der Carbonylgruppe bindet. Zuvor ist allerdings bereits das positiv geladene Lithium-Ion mit dem Sauerstoff der Carbonyl- und dem Stickstoff der Aminogruppe, die als stark elektronegative Elemente beide teilweise negativ geladen sind, in elektrostatische Wechselwirkung getreten. Dadurch entsteht ein relativ starrer Fünfring, der die beiden sperrigen Methylgruppen ($–CH_3$) am Stickstoff- und am asymmetrischen Kohlenstoffatom auf dieselbe Seite des Moleküls bringt. Das Hydrid-Ion kann sich der Carbonylgruppe daher nur von der anderen Seite nähern. Dadurch erhält das neu entstehende asymmetrische Zentrum aber die spiegelbildliche Konfiguration zu der im Pseudoephedrin. Während sich bei diesem die Hydroxyl- (–OH) und die Aminogruppe ($–NHCH_3$) beide auf derselben Seite (unter der Papierebene) befinden, liegen sie bei der Verbindung, die durch Reduktion von Methcathinon mit Lithiumaluminiumhydrid entsteht, auf unterschiedlichen Seiten (die eine über, die andere unter der Papierebene). Das Produkt ist übrigens das Ephedrin selbst. Es findet sich ebenso wie das Pseudoephedrin als Alkaloid in Gewächsen der Gattung *Ephedra* und wirkt ähnlich wie das bekanntere Stresshormon Adrenalin.

Zu Frage 4:
Ephedrin und Pseudoephedrin sind Stereoisomere und Diastereomere, nicht aber Enantiomere oder Konformationsisomere.

wünschte Komponente nachträglich entfernt werden muss. Mit physikalischen Mitteln ist das nicht möglich, weil die physikalischen Eigenschaften von Bild und Spiegelbild identisch sind. Das übliche Verfahren besteht darin, das Enantiomeren-Gemisch (oder Racemat, wie Chemiker sagen) mit einer anderen chiralen Verbindung reagieren zu lassen, die nur als Bild vorliegt – etwa weil sie biologischen Ursprungs ist. Dabei entstehen Diastereomere, die beispielsweise unterschiedliche Schmelzpunkte haben – wie Ephedrin und Pseudoephedrin – und sich dadurch trennen lassen. Anschließend muss das Hilfsmolekül wieder abgespalten werden.

Da dieses Prozedere sehr umständlich und aufwändig ist, hat die chemisch-pharmazeutische Industrie größtes Interesse an Herstellungsmethoden, die das gewünschte Enantiomer gleich in reiner Form liefern. Eine Möglichkeit besteht darin, auf biotechnologische Verfahren auszuweichen. Doch auch chemische Synthesen lassen sich inzwischen teilweise so gestalten, dass sie asymmetrisch verlaufen und bevorzugt ein Enantiomer ergeben. Das gelingt insbesondere mit einem Katalysator, der selbst chiral ist. Welche Bedeutung diese Forschungsrichtung hat, lässt sich unter anderem daran erkennen, dass der Chemie-Nobelpreis 2001 an drei Forscher ging, die solche asymmetrischen Synthesen mit chiralen Katalysatoren entwickelt haben.

Die nächste Internationale Chemie-Olympiade findet übrigens vom 16. bis 25. Juli in Taipeh (Taiwan) statt. ◁

Reinhard Demuth hält einen Lehrstuhl am Institut für die Didaktik der Chemie an der Universität Kiel, deren Rektor er seit 2000 ist. **Oliver Reiser** ist Professor für Organische Chemie an der Universität Regensburg und hat sich die Aufgabe für die Chemie-Olympiade ausgedacht, von der hier Fragen präsentiert wurden.

Rechts oder links in der Natur und anderswo. Von Henri Brunner. Wiley-VCH, Weinheim 1999

Weblinks zum Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Die Planetentafeln des Abraham Zacuto

Die »ewigen Tafeln« dieses jüdischen Astronomen entstanden in den Wirren des 15. Jahrhunderts auf der Iberischen Halbinsel. Sie förderten den Aufschwung der Astronomie in Europa und ließen Portugal und Spanien zu Weltmächten aufsteigen. Selbst im arabisch-islamischen Raum wurden sie rezipiert.

Von Uwe Reichert

Nehmen Sie irgendein Werk zur Geschichte der Astronomie zur Hand und Sie werden bekannte Namen finden wie Nikolaus Kopernikus, Tycho Brahe, Johannes Kepler oder Galileo Galilei. Diese Gelehrten erschütterten das mittelalterliche Weltbild in seinen Grundfesten und verhalfen – jeder auf seine Weise – dem heliozentrischen System zum Durchbruch. Als Vorläufer dieser wissenschaftlichen Revolutionäre wird sicherlich auch Ptolemäus genannt, der im 2. Jahrhundert n. Chr. das astronomische Wissen der griechischen Antike zusammenfasste. Aus der Zeit der vielen Jahrhunderte dazwischen wird womöglich noch der eine oder andere arabische Gelehrte erwähnt, der dazu beitrug, das Wissen der Griechen an das mittelalterliche Abendland weiterzureichen. Ein Name aber wird gewiss nicht auftauchen: Abraham Zacuto.

Zugegeben – der aus dem spanischen Salamanca stammende Abraham Zacuto ist selbst vielen Fachleuten nicht bekannt. Gleichwohl lohnt es, sich mit diesem Gelehrten des 15. Jahrhunderts zu beschäftigen. Denn eine Beschränkung auf die »Großen« der Astronomiegeschichte und ihre bahnbrechenden Erkenntnisse mag gerechtfertigt sein, um die Historie überschaubar zu halten – ausgewogen ist das dadurch vermittelte Bild jedoch nicht. Am Beispiel Zacutos lässt sich illustrieren,

- wie Astronomen in dem zu Ende gehenden Mittelalter arbeiteten,
- unter welchen Rahmenbedingungen das oftmals geschah und
- welche Bedeutung der Austausch zwischen den Kulturen für die Entwicklung der europäischen Wissenschaft hatte.

In die Lebenszeit des spanischen Astronomen fällt eine Reihe religiöser und politischer Umwälzungen auf der Iberischen Halbinsel. Zudem brachen spani-



AUS: »VASCO DA GAMA, DIE ENTDECKUNG DES SEEWEGS NACH INDIEN«, GERNOT GIERTZ (HG.), EDITION ERDMANN

Seefahrer erlitten oft Schiffbruch, weil sie ihre Position nicht genau kannten. Erst mit astronomischen Mitteln wurde Navigation auf hoher See möglich.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

sche und portugiesische Seefahrer zu epochalen Entdeckungs- und Eroberungsreisen auf, was nur mit Hilfe von Astronomen und Kartografen möglich war. Und der Übergang von der Handschrift zum gedruckten Buch veränderte den Fortschritt der Wissenschaft und die Verbreitung des Wissens von Grund auf.

Schicksalsjahre eines jüdischen Astronomen

Abraham Zacuto wurde 1452 in Salamanca geboren. Er entstammte einer jüdischen Familie, die zuvor in Frankreich beheimatet war und Anfang des 14. Jahrhunderts ins Exil nach Kastilien gehen musste. Diese spanische Provinz war als Erste von der jahrhundertelangen muslimschen Kolonialherrschaft befreit und für das Abendland zurückgewonnen worden. Wie für männliche Mitglieder einer jüdischen Gemeinde üblich, hatte Zacuto lesen und schreiben gelernt. Über diese Fertigkeiten verfügten zur damaligen Zeit ansonsten nur Kirchenleute. In Salamanca schöpfte Zacuto reichlich aus den Quellen, die christliche Gelehrte aus allen Teilen Europas an die dortige Universität gebracht hatten. Seine Kenntnis astronomischer Schriften in Arabisch bezog er vermutlich aus hebräischer und lateinischer Sekundärliteratur.

Im 15. Jahrhundert begannen portugiesische Seefahrer die Küste Afrikas zu erkunden. Über den Rest der Welt hatte das Abendland nur rudimentäre Vorstellungen, wie diese zeitgenössische Karte verdeutlicht.

Zacuto stand in der Tradition hebräisch schreibender Gelehrter aus dem 14. und 15. Jahrhundert. Der bekannteste von ihnen ist Levi ben Gerson, der mit eigenen Beobachtungen und Kritik am ptolemäischen Gedankengebäude für damalige Verhältnisse eine Außenseiterposition einnahm. Die Planetentafeln, seine erste astronomische Abhandlung, leg- ▷

te Zacuto nach fünf Jahren Arbeit 1478 ebenfalls in Hebräisch vor: Der »Ha-Chibbur hag-Gadol« (»Die große Zusammenstellung«) enthielt Regeln und Tabellen, mit denen man die Positionen der Planeten vorherberechnen konnte. Drei Jahre später übersetzte Juan de Salaya, der von 1464 bis 1469 den Lehrstuhl für Astronomie an der Universität Salamanca innegehabt hatte, mit Zacutos Unterstützung den »Chibbur« ins Kastilische.

Wenngleich sich über Salaya eine Verbindung Zacutos mit der Universität Salamanca herstellen lässt, bleibt die Beziehung zu dieser Institution unklar. Die von manchen Autoren geäußerte Meinung, Zacuto habe an der Universität Salamanca studiert oder dort sogar den Lehrstuhl für Astronomie übernommen, lässt sich nicht belegen. Der jüdische Gelehrte und seine christlichen Forscherkollegen machten zwar wechselseitigen Gebrauch von ihren Schriften, aber sie vermieden es offenbar, sich gegenseitig zu zitieren.

Zu einem unbekannten Zeitpunkt wechselte Zacuto von Salamanca nach Gata in der südlich von Kastilien gelegenen Provinz Cáceres nahe der Grenze zu Portugal. Dort fand er offensichtlich einen Gönner in Gestalt von Juan de Zúñiga y Pimentel. Dieser war der letzte Großmeister des Ordens von Alcántara, eines geistlichen Ritterordens, der »zur Verteidigung des christlichen Glaubens und zum ewigen Kriege gegen die Mauren« verpflichtet war.

Im Auftrag Zúñigas verfasste Zacuto 1486 eine »Kurze Abhandlung über die Einflüsse des Himmels«, später gefolgt von der Schrift »Über Sonnen- und Mondfinsternisse«. Ein anderes Werk, in dem er die Sonnenfinsternis vom 16. März 1485 beschrieb, ist verschollen. Neben diesem astronomischen Ereignis sind nur drei weitere eigene Beobachtungen Zacutos gesichert: 1474 verfolgte er eine Bedeckung des Sterns Spica durch den Mond, am 24. Juli 1476 eine Bedeckung der Venus durch den Mond und eine Sonnenfinsternis am 29. Juli 1478.

Für Spanien war das Jahr 1492 in dreierlei Hinsicht bedeutend. Zunächst gelang es den christlichen Heeren Granada einzunehmen, die letzte Bastion der Mauren auf der Iberischen Halbinsel. Dann wurden alle nicht getauften Juden des Landes verwiesen. Und schließlich entdeckte Christoph Kolumbus – unterwegs in spanischen Diensten – den amerikanischen Kontinent.

Während Spanien damit den Grundstein zur Weltmacht legte, musste sich der Jude Zacuto ins portugiesische Exil begeben. Portugal hatte ebenfalls die ersten Schritte zur Seefahrernation hinter sich: Madeira, die Azoren und die Kapverdischen Inseln waren entdeckt, erste Stützpunkte auf dem afrikanischen Kontinent eingerichtet. König Johann II. förderte die Entdeckungsfahrten mit dem Ziel, um Afrika herum den Seeweg nach Indien zu erschließen. Dazu brauchte er neben Kartografen und Mathematikern auch Astronomen. Trotz der in Portugal ebenfalls vorhandenen antisemitischen Strömungen gelang es Zacuto deshalb, in die Dienste König Johanns II. und – nach dessen Tod 1495 – seines Nachfolgers Emanuel I. zu treten.

Doch auch an seiner neuen Wirkungsstätte holte Zacuto das Schicksal ein. 1497 wurden die Juden in Portugal

Astrologen und Kalendermacher

Die Astronomen des Mittelalters betätigten sich auch als Sterndeuter. Horoskope wussten die Herrscher nämlich zu schätzen, bot doch der – vermeintliche – Einblick in die Zukunft ganz offensichtliche Vorteile bei anstehenden politischen Entscheidungen. Bis in die Neuzeit hinein vermischte sich die Astrologie mit der Astronomie. Selbst Johannes Kepler (1571–1630), der die Gesetzmäßigkeiten der Planetenbewegung erkannte und dem heliozentrischen Weltbild zum Durchbruch verhalf, erstellte für verschiedene Auftraggeber persönliche Horoskope.

Den größten praktischen Nutzen hatten die Kenntnisse der Astronomen jedoch für alltägliche Dinge der religiös geprägten Gesellschaften. Im Orient waren dies vor allem die Bestimmung der Kibla (der nach Mekka orientierten Gebetsrichtung), die Berechnung der täglichen Gebetsstunden sowie die Sichtbarkeit der schmalen Mondsichel nach Neumond, die im islamischen Mondkalender den Monatsanfang festlegte.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Das so genannte Horoskop Wallensteins, das Johannes Kepler kurz nach 1600 für den späteren Feldherrn Albrecht von Wallenstein erstellte.

Auch der Kalender des christlichen Abendlands orientierte sich an astronomischen Fixpunkten. So sollte nach dem Beschluss des Konzils zu Nicäa im Jahr 325 das Osterfest stets auf den ersten Sonntag nach dem ersten Vollmond im Frühling fallen. Der Frühlingsbeginn – also die Frühjahrs-Tag-und-Nacht-Gleiche – wurde dabei auf den 21. März festgelegt. Der so genannte Fastensonntag wurde sieben Wochen vor Ostern angesetzt, die Feiertage Himmelfahrt, Pfingsten und Fronleichnam hingegen 40, 50 beziehungsweise 60 Tage nach Ostern.

Die Kalenderberechnung blieb seitdem ein Standardthema für die Astronomen. Ab dem 13. Jahrhundert war nicht mehr zu übersehen, dass der julianische Kalender von den astronomischen Daten abwich. Da die Jahreslänge – einst von Julius Cäsar auf 365,25 Tage festgelegt – rund elf Minuten länger war als das tatsächliche Sonnenjahr, hatte sich diese Differenz im Laufe der Jahrhunderte so weit aufsummiert, dass sich die kirchlichen Feste um mehrere Tage von den astronomischen Terminen unterschieden. Für eine Reform des julianischen Kalenders, die nach mehreren Anläufen schließlich von Papst Gregor XIII. 1582 eingeführt wurde, war die Mitarbeit von Astronomen unentbehrlich.

Etwa zu jener Zeit entstanden auch die ersten Sternwarten in Europa – ebenfalls aus einem praktischen Bedürfnis heraus: Die Seefahrt benötigte dringend ein Verfahren, um fernab der Küsten die geografische Länge des Standorts bestimmen zu können.

zwangskonvertiert. Zacuto setzte sich mit seinem Sohn Samuel nach Nordafrika ab und ließ sich in Tunis nieder. Dort beendete er die Arbeit an seinem Geschichtswerk »Sefer Yuchasin« (»Buch der Genealogien«). Im Folgejahr verfasste er eine astrologische Theorie der Geschichte, derzufolge Finsternisse und gewisse Planetenstellungen die Geschehnisse auf der Erde bestimmen sollten.

Die »Chibbur«-Tabellen, die er ursprünglich für das Jahr 1473 berechnet hatte, passte Zacuto nun an das Jahr 1501 an. Später, als er nach Damaskus und Jerusalem weitergezogen war, berechnete er neue Planetentafeln, die mit dem Jahr 1513 begannen und an den jüdischen Kalender sowie den Meridian von Jerusalem angepasst waren. Als mehrfach Vertriebener starb Zacuto um 1515 fernab seines Geburtsorts, aber in der Heimat seines Glaubens.

Die Alfonsinischen Tafeln und ihre Nachfolger

Der Hof des kastilischen Königs Alfonso X. (1221–1284, König seit 1252) in Toledo entwickelte sich zum kulturellen und wissenschaftlichen Mittelpunkt der Iberischen Halbinsel. Im Auftrag des Regenten erstellte ein Astronomenkollegium, dem die beiden jüdischen Gelehrten Jehuda ben Mose und Isaak ben Sid angehörten, in den Jahren 1263 bis 1272 ein astronomisches Tabellenwerk. Diese so genannten Alfonsinischen Tafeln enthielten alle Daten und Hilfsmittel, die man brauchte, um – auf der Grundlage des ptolemäischen Planetensystems – die Positionen von Sonne, Mond und Planeten zu bestimmten Zeiten zu berechnen. Das Tafelwerk sollte die Toledanischen Tafeln ersetzen, die der muslimische Astronom Ibn as-Sarkali (auch unter dem latinisierten Namen Arzachel bekannt) um 1070 herausgegeben hatte.

Zwei sehr verschiedene Versionen der Alfonsinischen Tafeln haben sich erhalten: einerseits der originale kastilische Text der Kanones (Anleitungen zur Nutzung der Tafeln), für die allerdings die zugehörigen nummerischen Tabellen nicht überliefert sind; andererseits erschienen in Paris revidierte nummerische Tafeln mit lateinischen Inschriften und ohne Kanones. Jene zweite Version motivierte nach 1320 mehrere europäische Astronomen – wie Jean de Saxe, Jean de Murs und Jean de Linières in Paris –, eigene Kanones zu verfassen, die den »kopflosen« Tafeln beigestellt wurden.

Diese lateinischen Ausgaben der Alfonsinischen Tafeln waren enorm erfolgreich; sie erschienen ab 1483 in einer Vielfalt gedruckter Ausgaben. Sie dominierten die europäische Astronomie, bis 1551 Erasmus Reinhold die Preußischen oder Prutenischen Tafeln veröffentlichte. Diese Planetentafeln – benannt zu Ehren des Herzogs Albrecht von Preußen – stützten sich auf die heliozentrische Theorie von Nikolaus Kopernikus. 1627 schließlich druckte Johannes Kepler die Rudolfinischen Tafeln, die er nach den Beobachtungen von Tycho Brahe berechnet und dem verstorbenen Kaiser Rudolf II. gewidmet hatte.

Detail der astronomischen Uhr im Chorumgang der Nikolaikirche in Stralsund: der spanische König Alfonso X., genannt der Weise.

GOTTHARD STROHMAIER

In Diensten der »Junta dos Mathematicos«

Diese kurze Skizze von Zacutos Biografie zeigt, wie stark sein persönliches Schicksal durch seine Religion und Profession mitbestimmt wurde. Solch unstete Lebensumstände sind in der Geschichte der Wissenschaft freilich nicht selten. Man denke beispielsweise an die in den 1930er Jahren aus Deutschland vertriebenen jüdischen Forscher.

Dass Staaten allerdings auch in der Lage sein können, ihre Prinzipien hintanzustellen, wenn sie sich dadurch einen Vorteil versprechen, zeigt Zacutos Werdegang ebenso wie eine weitere moderne Parallele: Nach Ende des Zweiten Weltkriegs waren die deutschen Ingenieure, welche die erste Fernrakete gebaut hatten, begehrte Gäste in den USA beziehungsweise in der Sowjetunion. Nachdem sie dort ihre Pflichten getan und dem Raketenprogramm der beiden Supermächte zur Initialzündung verholfen hatten, erinnerte man sich wieder ihrer unbequemen Herkunft und verwies sie – zumindest die meisten – des Landes.

Rund 450 Jahre vor Wernher von Braun und seiner V2-Rakete war es Portugals ehrgeiziges Flottenprogramm, das der aufstrebenden Seefahrernation helfen sollte, eine Weltmachtstellung einzunehmen. Um ein verlässliches System zur Positionsbestimmung und Navigation fernab der Küsten zu erarbeiten, zog der portugiesische Königshof all jene als Berater heran, die Kenntnisse in Kartografie, Astronomie und Mathematik besaßen. In diese illustre Runde der Seefahrtkommission, der so genannten »Junta dos Mathematicos«, fand der Jude Zacuto genauso Eingang wie ein aus Nürnberg stammender Kaufmann namens Martin Behaim (siehe Kasten auf S. 80).

Mit der Verbesserung der Navigation übernahmen die Astronomen des 15. Jahrhunderts nun eine dritte Aufgabe. Jahrhundertelang hatte ihre Tätigkeit im Wesentlichen zweierlei umfasst: astrologische Vorhersagen zu machen sowie den Kalender zu berechnen (siehe Kasten links). Für all diese Dinge war es unerlässlich, die Positionen von Sonne, Mond, Merkur, Venus, Mars, Jupiter und Saturn – die damals alle als Himmelskörper angesehen wurden, die sich um die Erde bewegen – und ihre Stellungen zueinander für beliebige Zeitpunkte berechnen zu können.

Grundlage für die Bestimmung der Planetenbewegungen waren periodische Zyklen dieser Wandelsterne, die seit ältesten Zeiten bekannt sind. Dazu gehören der Tages- und der Jahreslauf der Sonne, die wechselnden Lichtgestalten des Monds innerhalb eines Monats und seine Bahn zwischen den Fixsternen, die Sichtbarkeiten von Merkur und Venus am Morgen- oder Abendhimmel sowie die Umlaufperioden und Schleifenbahnen von Mars, Jupiter und Saturn.

Bereits babylonische Astronomen rechneten in Zyklen, in denen sich die Stellungen der Planeten zueinander wiederholen. Ptolemäus nutzte diese himmlischen Rhythmen, um die Planetenbewegungen mit seinem Epizykelmodell zu erklären (siehe Kasten auf S. 79). In Tabellenwerken wurden die Planetenpositionen und andere Phänomene für einen längeren Zeitraum in Tagesschritten aufgelistet. ▷

JULIO SAMSO / AUS: »ALMANACH PERPETUUM«, 1496, FAKSIMILE, EDITION LEIRIA, LISSABON 1986

Dieser Ausschnitt aus dem »Almanach perpetuum« zeigt für die zweite Hälfte (Monate September bis Februar) des ersten Jahres eines vierjährigen Zyklus die Position der Sonne auf der Ekliptik. Angegeben ist die ekliptikale Länge, die innerhalb jedes Tierkreiszeichens von null bis 30 Grad gemessen wurde. Zacuto beginnt das Jahr am 1. März und gibt für jeden Tag die wahre Länge der Sonne in Grad, Minuten und Sekunden an.

In einem in London aufbewahrten Papyrus, der ein Horoskop für das Jahr 81 n. Chr. enthält, heißt es: »Die alten Männer von Ägypten, die die himmlischen Körper getreulich studiert und die Bewegung der sieben Götter gelernt hatten, brachten alles zusammen und ordneten es in ewigen Tafeln, und sie überlieferten uns großzügig die Kenntnis dieser Dinge. Aus diesen Tafeln habe ich für jeden der sieben genau berechnet und angeordnet nach Graden, Minuten und Sekunden die Aspekte und Phasen und, um keine Zeit zu verlieren mit der Aufzählung der einzelnen Punkte, schlicht alles, was ihre Untersuchung betrifft.«

Solche »ewigen Tafeln« hießen im Mittelalter »Almanache«. Wenngleich das Wort arabischen Ursprungs ist, konnten die Etymologen seine Herkunft nicht sicher klären. Es taucht erstmals in einer – nur in Latein erhaltenen – Schrift des jüdischen Gelehrten Abraham Ibn Ezra auf, der im 12. Jahrhundert auf der Iberischen Halbinsel und in Italien wirkte. In der Neuzeit setzten sich für solche Tabellenwerke die Begriffe »Planetentafeln«, »Ephemeriden« und schließlich »Jahrbuch« durch.

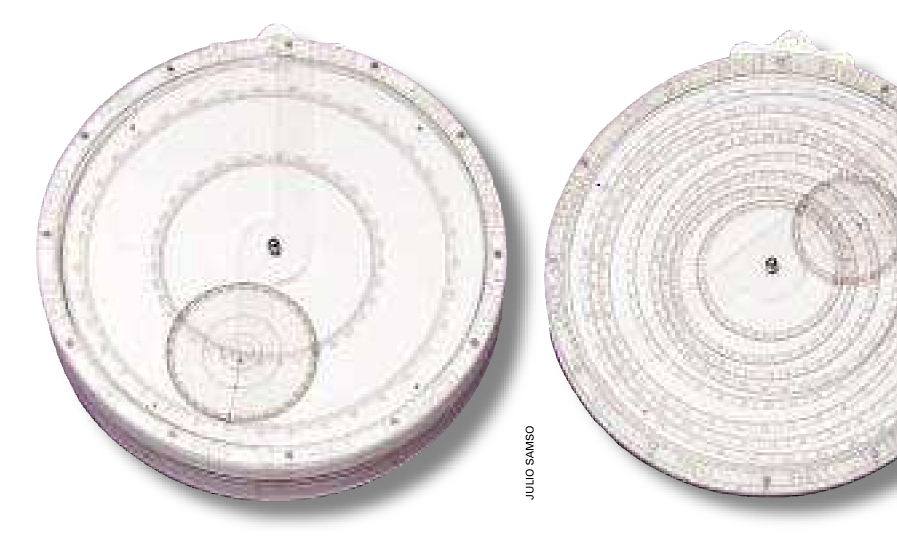
Den ältesten bekannten Almanach aus dem maurischen Spanien verfasste as-Sarkali (latinisiert: Arzachel) um 1070 in Toledo. Die Nachfolger dieser Toledanischen Tafeln entstanden rund 200 Jahre später an gleichem Ort, diesmal allerdings unter veränderten Rahmenbedingungen. Denn längst hatten kastilische Truppen die zentralspanische Stadt von den Arabern zurückerobert; Toledo war nun Königsresidenz. Im Auftrag von König Alfonso X., einem Förderer der Künste und der Wissenschaften, berechnete ein Astronomenkollegium neue Tabellen, die Alfonsinischen Tafeln (siehe Kasten auf S. 77).

Auf dieses Kompendium wiederum stützte sich Zacuto weitere 200 Jahre später, als er seine Planetentafeln, den »Chibbur«, erstellte. Dieses Werk besteht aus zwei Teilen: einem Kanon genannten einführendem Lehrbuch und zahlreichen nummerischen Tafeln, die auf dem julianischen Kalender basieren. Der Kanon ist in 19 Kapitel aufgeteilt, die den 19-jährigen metonischen Zyklus widerspiegeln (benannt nach dem Griechen Meton, der im 5. Jahrhundert v. Chr. feststellte, dass die Mondphasen nach dieser Zeitspanne wieder auf die gleichen Tage des Jahres fallen.) Diese Besonderheit drückt die Absicht Zacutos aus, seine Tabellen speziell für den jüdischen Lunisolarkalender zu berechnen. Deswegen konzentrierte er sich auf die Positionen von Sonne und Mond und deren besondere Stellungen zueinander, die mit der Entstehung von Sonnen- und Mondfinsternissen zusammenhängen.

Der »Almanach perpetuum«

Aus dem »Chibbur« entstanden eine Reihe von Übersetzungen und modifizierten Planetentafeln: Der jüdische Gelehrte Joseph Vizinus – ein Mitglied der »Junta dos Mathematicos« am portugiesischen Königshof – veröffentlichte eine ins Lateinische sowie ins Kastilische übersetzte Sammlung mit dem Titel »Almanach perpetuum«. Die erste Ausgabe dieser Planetentafeln wurde 1496 in der portugiesischen Hafenstadt Leiria gedruckt. Zacuto war in diese Variante vermutlich nicht involviert.

Verschiedene Merkmale der Erstausgabe lassen erkennen, dass der »Almanach« für ein christliches Publikum gedacht war. Die zahlreichen Schreib- und Satzfehler – die darauf hindeuten, dass das Tafelwerk hastig für den Druck vorbereitet wurde – sind in einer zweiten Ausgabe zum Teil korrigiert. Der He-



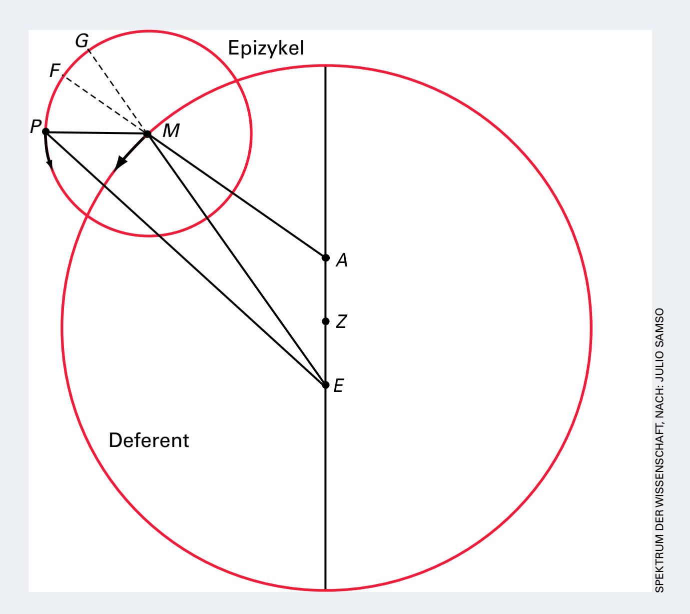
JULIO SAMSO

Die Position von Planeten zu berechnen, war einst mühevolle Handarbeit. Muslimische Gelehrte im maurischen Spanien konstruierten deshalb spezielle Rechenscheiben. Statt zeitaufwändig mit Tabellen und Zahlenkolonnen zu hantieren, genügte es nun, die Skalen auf der Scheibe einzustellen. Hier Rekonstruktionen der im 11. Jahrhundert entworfenen Planetenrechner von Ibn as-Samh (links) und as-Sarkali.

Die Zyklen der Planeten und die Berechnung ewiger Tafeln

Den Vorstellungen in der Antike zufolge sollten sich die Planeten – zu denen damals auch Sonne und Mond zählten – als göttliche Körper mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf idealen Kreisen bewegen. Da die Wandelsterne am Himmel aber Unregelmäßigkeiten zeigen wie Schleifenbahnen und Helligkeitsänderungen und selbst die Sonne verschiedene Bahnstücke mit unterschiedlicher Geschwindigkeit durchläuft, ersann Ptolemäus im 2. Jahrhundert n. Chr. ein geniales Modell, das die Beobachtungen recht genau zu erklären vermochte.

In diesem Modell (rechts) bewegt sich der Planet *P* mit konstanter Geschwindigkeit auf einem kleinen Kreis, dem Epizykel, dessen Mittelpunkt *M* sich ebenfalls mit gleichförmiger Geschwindigkeit auf einem größeren Trägerkreis, dem Deferenten, bewegt. Um die beobachteten Ungleichheiten der Planetenbewegung nachzubilden, führte Ptolemäus eine Korrektur ein. Die gleichförmige Umlaufbewegung des Epizykels sollte nicht um das Zentrum *Z* des Deferenten stattfinden, sondern um einen Ausgleichspunkt *A*. Dieser auch *punctum aequans* oder Äquant genannte Punkt wurde genauso weit vom Zentrum *Z* verschoben wie die Position der Erde *E* in die andere Richtung.



SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT, NACH: JULIO SAMSO

Planet	*n* Sonnenjahre	*m* Umläufe des Epizykelzentrums *M* auf dem Deferenten	*p* Umläufe des Planeten *P* auf seinem Epizykel
Saturn	59	2	57
Jupiter	71	6	65
Mars	79	42	37
Venus	8	8	5
Merkur	46	46	145

Diese Konstruktion lieferte passable Ergebnisse, erschwerte aber die Berechnung der Planetenpositionen. Um überhaupt rechnen zu können, brauchte man zunächst Angaben über die mittlere Bewegung der Planeten. Dazu diente das Verhältnis ihrer Umlaufperioden. Wenn ein Sonnenjahr vergangen ist, steht die Sonne wieder an der gleichen Stelle im Tierkreis. Nach einer synodischen Periode hat ein Planet relativ zur Sonne und zur Erde wieder die gleiche Stellung am Firmament erreicht, aber erst nach einem Vielfachen davon geschieht dies wieder zur gleichen Jahreszeit. Die erste Sichtbarkeit der Venus am Morgenhimmel zum Beispiel wiederholt sich alle 584 Tage. Das Fünffache dieser synodischen Periode entspricht acht Sonnenjahren. In dieser Zeit hat der Planet achtmal den gesamten Tierkreis durchwandert. Für Jupiter hingegen entsprechen 65 synodische Perioden 71 Jahren und sechs kompletten Umrundungen des Firmaments. Diese Zahlenverhältnisse, die bereits den Babyloniern bekannt waren, lassen sich nun auf das ptolemäische Planetenmodell übertragen. In *n* Sonnenjahren vollendet dabei der Mittelpunkt des Epizykels *m* Umläufe auf dem Deferenten; in der gleichen Zeitspanne läuft der Planet *p*-mal auf seinem Epizykel herum.

Auf diese Weise wiederholen sich die Positionen der Planeten nach einem Zyklus von *n* Jahren an denselben Tagen des solaren Jahres. Dadurch genügt es, für jeden Planeten einen Zyklus komplett auszurechnen, um Tafeln von unbegrenzter Gültigkeit zu erhalten: Der Nutzer beschränkt sich darauf festzustellen, welche Ordnungsnummer das laufende Jahr innerhalb eines jeden Zyklus hat und liest dann in den Tafeln zu dem gewünschten Tag den Längengrad des jeweiligen Planeten ab.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

BIBLIOTHÈQUE NATIONALE, PARIS

Diese Miniatur aus der Zeit um 1325 zeigt das geozentrische Weltbild: über der Erde die sieben Gestirne Mond, Merkur, Venus, Sonne, Mars, Jupiter und Saturn sowie die Sphäre der Fixsterne und Gottvater als Schöpfer.

Georg Peuerbach, Regiomontanus und Martin Behaim

Drei Landratten als Pioniere der astronomischen Navigation

Nicht nur auf der Iberischen Halbinsel erhielt die Astronomie im 15. Jahrhundert befruchtende Anstöße. Auch in Mitteleuropa war die Zeit reif für Neuerungen. Die abendländischen Gelehrten hatten jahrhundertelang die Himmelsphänomene rein philosophisch-theologisch gedeutet. Praktische Beobachtungen waren verpönt gewesen. Und das Wissen der Griechen war bereits in der Frühzeit des Christentums aus dem kollektiven Gedächtnis verbannt worden, weil es als heidnisches Teufelszeug galt. Doch mit der eingeläuteten Renaissance setzten sich auch in der Himmelskunde neue Denkweisen durch.

Einer der Männer, der mit den Traditionen brach und der beobachtenden Astronomie in Europa zu ihrem Recht verhalf, wurde 1436 als Hans Müller im fränkischen Städtchen Königsberg östlich von Schweinfurt geboren. Der Name Regiomontanus (lateinisch: »Königsberger«), unter dem ihn die Nachwelt kennt, kam erst Jahrzehnte nach seinem Tod in Gebrauch.

Bereits im Alter von elf Jahren begann Regiomontanus an der Universität Leipzig zu studieren. Um 1450 wechselte er nach Wien. Sein Lehrer, der Humanist und Mathematiker Georg Peuerbach (1423–1461), hatte sich während eines mehrjährigen Italienaufenthalts in die Werke der antiken Astronomen eingearbeitet. Diese Bücher lagen in Übersetzungen aus dem Arabischen vor, in die sich allerdings zahlreiche Übertragungsfehler eingeschlichen hatten. Peuerbach machte sich daran, den »Almagest« des Ptolemäus neu zu übersetzen. Zudem begann er, nach den Beschreibungen in den griechischen und arabischen Quellen astronomische Instrumente zu fertigen und mit ihnen Himmelsbeobachtungen durchzuführen. In Regiomontanus fand Peuerbach einen fähigen Mitarbeiter.

Im Jahr 1461 lud Kardinal Bessarion, ein Förderer der Wissenschaften und Sammler griechischer Handschriften, Peuerbach und Regiomontanus ein, in Rom die unverfälschten griechischen Originale zu studieren. Wegen des plötzlichen Tods Peuerbachs musste Regiomontanus das Vorhaben alleine ausführen. Er vollendete die Übersetzung des »Almagest«, die für mehrere Generationen zu einem grundlegenden Lehrbuch der Astronomie wurde.

Ab 1468 hatte Regiomontanus die Position eines Hofastronomen des ungarischen Königs Matthias Corvinus inne. In jener Zeit

Regiomontanus errechnete nicht nur Gestirnspositionen, sondern baute auch einfache Messgeräte wie den Jakobsstab – beides unerlässliche Hilfsmittel für die Seefahrt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

rausgeber dieses Werks hatte offenkundig Zugang zu den Planetentafeln, die der deutsche Astronom Regiomontanus 1467 erstellt hatte und die 1490 unter dem Titel »Tabulae directionum« in Augsburg gedruckt wurden. So ist der Einleitungstext im »Almanach« praktisch eine wortwörtliche Übernahme aus Regiomontanus' »Tabulae«.

In diesen kleinen Details der von Vizinus bearbeiteten Planetentafeln spiegeln sich zwei stürmische Entwicklungen wider, die im 15. Jahrhundert den Aufschwung der Astronomie beflügelten. Zum einen sorgte der von Gutenberg erfundene Buchdruck mit beweglichen Lettern in ganz Europa für eine rasche Verbreitung astronomischer Werke. Insbesondere Kalender und Planetentafeln gehörten zu den bevorzugten Druckerzeugnissen jener Zeit; der »Almanach perpetuum« war überhaupt die erste wissenschaftliche Abhandlung, die in Portugal gedruckt wurde. Zum anderen bestand durch die zahlreichen Expeditionen, mit denen Portugal und Spanien sich anschickten, die Weltmeere und ferne Länder zu erobern, ein hoher Bedarf an astronomischen Tabellenwerken. Nur mit der Hilfe des »Almanach« konnten Seefahrer auf hoher See navigieren.

Begleiter auf allen Meeren

Den »Almanach perpetuum« nutzten denn auch viele Abenteurer auf ihren gefahrvollen Reisen. Im Juli 1497 stach Vasco da Gama zu seiner berühmten Indienreise in See, die ihn um die Südspitze Afrikas führte. Ende 1498 und Anfang 1500 erreichten portugiesische und spanische Seefahrer die Küste Brasiliens. Auch Christoph Kolumbus, der auf seiner ersten Reise 1492 bereits Zacutos »Chibbur« benutzte, hatte auf seinen späteren Fahrten den »Almanach« dabei.

Spätere Ausgaben des »Almanach perpetuum« erschienen ab 1498 in Venedig. Zu diesen lateinischen Fassungen gesellte sich 1507 auch eine arabische Version, die ein jüdischer Arzt – vermutlich in Konstantinopel – anfertigte. Nennenswerte Verbreitung im Orient fand jedoch erst eine zweite Übersetzung ins Arabische, die ein Jahrhundert später am entgegengesetzten Ende des Mittelmeers entstand. Der Muslim Achmad Ibn Qasim al-Hadschari hatte 1599 Spanien verlassen und sich im marokkanischen Marrakesch niedergelassen, wo er sich als Übersetzer in die Dienste eines Sultans begab. Al-Hadschari hatte zu den Morisken gehört – so nennt man die Mauren, die nach Ende der arabischen Herrschaft in Spanien zurückgeblieben waren und zumindest nach außen hin die christliche Religion angenommen hatten.

Wenngleich Zacuto selbst mehrere Jahre im Maghreb gelebt hatte, wirkte sich dies offenbar nicht auf die Verbreitung seiner Planetentafeln im arabisch-islamischen Raum aus. Erst die Übersetzung von al-Hadschari, die in mehreren

schuf er mehrere astronomische Tafelwerke und konstruierte neue Messinstrumente. 1471 schließlich ließ sich Regiomontanus in Nürnberg nieder und errichtete dort eine kleine Sternwarte, eine Druckerei sowie eine Werkstatt für den Instrumentenbau. Die von ihm errechneten Planetentafeln – in denen er für jeden Tag der Jahre 1475 bis 1506 die Positionen der Himmelskörper angab – machten ihn im In- und Ausland berühmt.

Als ausgewiesener Kalenderfachmann wurde Regiomontanus 1475 von Papst Sixtus IV. nach Rom gerufen, um eine Reform des julianischen Kalenders auszuarbeiten. Doch nach knapp einjährigem Aufenthalt dort starb der Astronom – im Alter von nur vierzig Jahren – an der Pest. So sollte noch ein weiteres Jahrhundert vergehen, bis die Kalenderreform schließlich unter Papst Gregor XIII. zu Stande kam.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Noch ohne Kenntnis der Reisen des Kolumbus' konstruierte der Kaufmann Martin Behaim in Nürnberg 1492 den »Erdapfel«, den ältesten erhaltenen Globus der Welt.

Ein junger Kaufmann aus Nürnberg trug zur Verbreitung von Regiomontanus' Instrumenten und astronomischen Tafeln bei: Martin Behaim (etwa 1459–1506). Auf seinen Handelsreisen brachte er die Kunde davon nach Portugal. Erstmals scheint er sich 1482 in Lissabon aufgehalten zu haben – in dem Jahr, in dem Christoph Kolumbus vergeblich am portugiesischen Königshof um Unterstützung für seine geplante Westfahrt nach Indien nachgesucht hatte, und nur ein Jahr, nachdem Zacutos kastilische Ausgabe des »Chibbur« erschienen war.

Nach einem vorübergehenden Aufenthalt in seiner Heimatstadt kehrte Behaim um 1484 nach Lissabon zurück. In seinem Gepäck befanden sich neben Regiomontanus' Tabellenwerken auch astronomische Instrumente, die Nürnberger Handwerker aus Metall hergestellt hatten.

Für die aufstrebende Seefahrernation Portugal erwies sich insbesondere der Jakobsstab als förderlich. Dies ist ein Winkelmessgerät aus zwei gekreuzten Stäben, mit dem sich die Abstände der Gestirne vom Horizont bestimmen lassen (Bild links). Im Gegensatz zu bisherigen Instrumenten wie etwa den Astrolabien konnte dieses Gerät – ein Vorläufer des späteren Sextanten – nicht nur auf festem Boden, sondern auch auf dem schwankenden Deck eines Schiffes eingesetzt werden.

Behaim wurde in die »Junta dos Mathematicos« aufgenommen und nahm an Entdeckungsfahrten entlang Afrikas Küste teil. Seine dabei erworbenen Kenntnisse nutzte er später für die Herstellung seines berühmten »Erdapfels« (Bild oben).

Handschriften erhalten ist, zog die Aufmerksamkeit maghrebinischer Gelehrter auf sich. Im 17. und 18. Jahrhundert entstand eine Reihe von Kommentaren und Zusammenfassungen, die sich eingehend mit der Positionsbestimmung anhand des »Almanach« befassten. Allerdings gab es auf Grund der Schwierigkeiten für einen arabischen Leser, zwischen dem Lateinischen und dem Kastilischen zu unterscheiden, einige Verwirrungen über die Autorenschaft. Mal erschien Zacuto als Christ, mal Joseph Vizinus als muslimischer Übersetzer namens Jusuf al-Andalusi. Gelegentlich erhielt Zacuto selbst den Vornamen Jusuf angedichtet.

Mindestens eine maghrebinische Handschrift erreichte Ägypten, zwei weitere fanden ihren Weg sogar bis in den Jemen. Dort wurden sie Anfang des 18. Jahrhunderts kritisch analysiert und benutzt, um neue Ephemeriden zu berechnen und die erreichbare Genauigkeit mit Beobachtungen zu vergleichen.

Die beiden arabischen Übersetzungen des »Almanach perpetuum« stellen somit eines der wenigen Beispiele dar, in denen sich ein gewisses Interesse der arabisch-islamischen Welt an der wissenschaftlichen Tradition der europäischen Renaissance manifestiert. Die gängige Ansicht ist die, dass der Wissenstransfer nur in einer Richtung stattfand, nämlich vom Orient in das Abendland. In gewissem – wenngleich bescheidenerem – Maße rezipierten jedoch zu Beginn der Neuzeit auch arabische Gelehrte die Werke europäischer Autoren.

Die Planetentafeln Zacutos mögen eher indirekt auf die Kultur- und Weltgeschichte eingewirkt haben. Dennoch ist sein Einfluss auf die wissenschaftlichen und politischen Entwicklungen des 15. Jahrhunderts nicht zu übersehen. Künftigen Forschungsarbeiten wird es vorbehalten bleiben, seine Rolle in der Universität Salamanca und der »Junta dos Mathematicos« genauer zu beleuchten. ◁

AUTOR UND LITERATURHINWEISE



Uwe Reichert hat in Physik promoviert und ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft. Zu seinen besonderen Interessensgebieten gehört die Astronomiegeschichte.

Abraham Zacuto y la astronomía europea en el mundo árabo-islámico. Von Julio Samsó in: Investigación y Ciencia, Juli 2003, S. 68

Astronomy in the Iberian Peninsula. Abraham Zacut and the transition from manuscript to print. Von José Chabás und Bernard R. Goldstein. Transactions of the American Philosophical Society, Bd. 20, Heft 2. Philadelphia 2000

Islamic Astronomy and Medieval Spain. Von Julio Samsó. Collected Studies Series, CS428, Variorum, 1994

Almanach perpetuum celestium motuum. Tabulae astronomicae Raby Abraham Zacuti astronomi Johannis Secundi et Emanuelis serenissimorum regum Portugaliae. Von Avraham Ben-Semûel Zakkût. Faksimile der lateinischen Ausgabe von 1496. J. B. Obernetter, München 1915

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

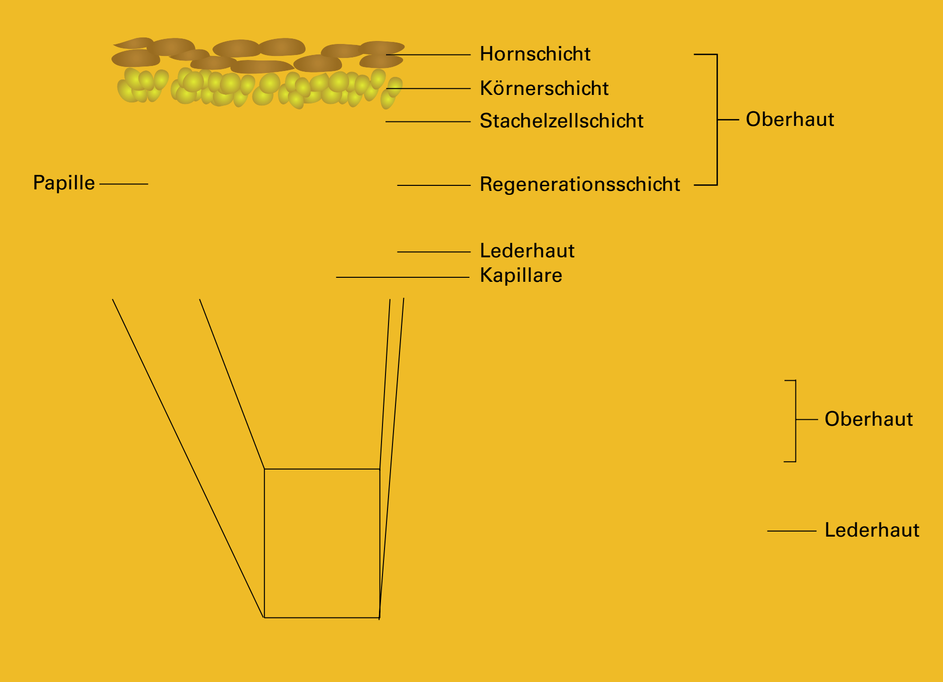
Das Altern gehört zum Menschsein, doch jugendliches Aussehen genießt einen hohen Stellenwert.

Forschen gegen Falten

Schönheit ist in unserer Gesellschaft ein hochgeschätztes Gut, doch leider kein beständiges: Durch Alterung, Umwelteinflüsse und eigenes Verschulden verliert die Haut ihr straffes Aussehen, die Haarpracht büßt an Glanz ein. Schon die frühen Hochkulturen kannten Rezepturen dagegen, machten mit Cremes und Tinkturen gegen Falten und lichtes Haar mobil. Die heutige Kosmetikindustrie setzt auf Erkenntnisse aus Medizin und Molekularbiologie.

▷

Die Haut hat viele Funktionen: Schutz gegen mechanische und chemische Angriffe, Verdunstungsbarriere und schließlich auch Kontaktfläche



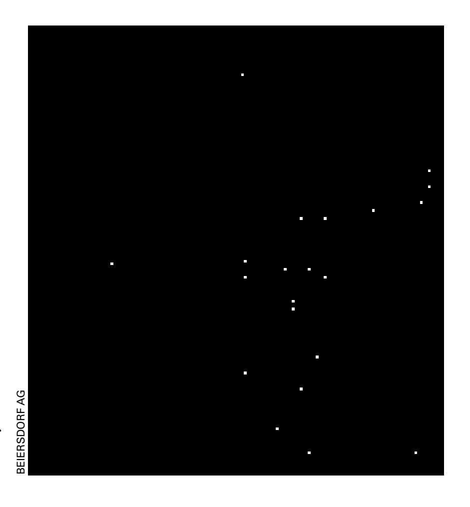
SIGANIM / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

»Welcher Zusammenhang zwischen den Telomeren und unseren DNA-Stücken besteht, ist noch nicht vollständig klar«, so Hadschiew. »Aber wir wissen, dass ihr Schutz hundertmal besser ist als bei den Thymidin-Dimeren.« Die DNA-Stücke scheinen sogar so gründlich zu arbeiten, dass sie möglicherweise bereits vorhandene Hautveränderungen rückgängig machen können, wie erste Studienergebnisse hoffen lassen.

Der Reparatur von UV-Schäden widmet sich auch Jean Krutmann von der Universität Düsseldorf. Er setzt dabei auf ein ganz anderes Mittel: die Photolyase, ein Enzym, das aus der Blaualge *Anacystis nidulans* gewonnen wird. Das Algenprotein erkennt die besagten, für UV-Licht typischen Thymidin-Dimere in der DNA. Es heftet sich daran, löst die Verbindung zwischen den beiden Basen wieder auf und der Schaden ist behoben.

Die Einmal-Gentherapie

Krutmanns Photolyasecreme funktioniert so gut, dass sie mittlerweile als Sonnenschutzlotion in der Apotheke erhältlich ist. Doch ist auch sie kein Allheilmittel gegen Hautalterung. Denn nicht nur Strahlen aus dem UV-Bereich berauben unsere Hülle ihres jugendlichen Aussehens. Wie Krutmann und sein Team festgestellt haben, beschleunigt auch das bislang als harmlos erachtete infrarote (IR) Licht den Alterungsprozess. Es aktiviert – genau wie UV-Strahlung und Zigarettenrauch – ein Enzym namens Matrixmetalloproteinase I, auch Kollagenase I genannt. Wie der Name bereits andeutet, baut dieses das Kollagen im Bindegewebe der Haut ab. Gerade das aber ist gemeinsam mit dem Elastin hauptverantwortlich für die Elastizität unserer Haut und damit für Jugendfrische. Gehen Kollagen und Elastin verloren, erschlafft das Gewebe und es bilden sich Falten.

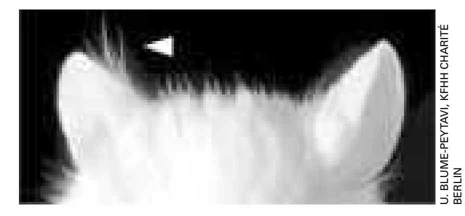


BEIERSDORF AG

Welche Gene sind in junger, welche in reifer Haut aktiv? DNA-Chips helfen, diese Frage mit erträglichem Aufwand zu beantworten: Testsequenzen von DNA in den einzelnen Feldern fragen viele Gene gleichzeitig ab.

Ein mögliches Werkzeug, um Nachschub zu liefern, hat Ulrich Hengge in der Hand. Der Hautarzt, der ebenfalls an der Universität Düsseldorf tätig ist, schleust die Erbinformation für Kollagen oder Elastin in die Haut ein, indem er sie in winzige Fettkügelchen, so genannte Liposomen, verpackt. Hengge und seine Mitarbeiter haben ihre Idee zunächst an Gewebekulturen getestet – mit Erfolg: Wird die genetische Information für Kollagen oder Elastin derartig verpackt ins Nährmedium gegeben, so beginnen die Zellen die entsprechenden Proteine zu bilden. »Jetzt gilt es herauszufinden, ob wir den gleichen Effekt erzielen, wenn wir die Kollagen-Gene in eine Creme verpackt auf die Haut auftragen.« Dazu bereiten die Forscher derzeit eine Studie mit Mäusen vor. »Wir müssen nicht nur beweisen, dass das Verfahren prinzipiell funktioniert, sondern auch herausfinden, in welcher Dosis wir die Erbinformation zuführen müssen, damit wir überhaupt den gewünschten Effekt erzielen.«

Gegen Haarausfall ist noch kein Kraut gewachsen. Doch Berliner Forscher injizierten Stammzellen in normalerweise haarlose Mäuseohren. Und siehe da: Den Nagern sprossen Haare.



U. BLUME-PEYTAVI, KFHH CHARITÉ BERLIN

Doch ist eine Gentherapie zu kosmetischen Zwecken nicht unumstritten – auch wenn Hengges Methode keine dauerhafte Veränderung der Haut nach sich zieht. Die eingeschleusten Gene integrieren sich nicht ins Erbgut und bleiben daher nur eine Woche lang aktiv. Zudem werden die behandelten Hautzellen regelmäßig abgestoßen. »Trotzdem propagieren wir in unserer Arbeitsgruppe keine Gentherapie zur Faltenreduktion«, so Hengge. Vielmehr nutzt der Wissenschaftler die Experimente mit Kollagen und Elastin als ein Beispiel, mit dem er testet, wie gut sein Verfahren funktioniert, um es später etwa zu einer Behandlung von Hautkrebs und anderen Erkrankungen umzumünzen. Auch Impfstoffe, die vor gefährlichen Hautveränderungen schützen sollen, sind mit dieser Methode denkbar.

Hauptschalter für die Alterung?

Das Kollagen selbst bleibt jedoch ein wichtiges Studienobjekt für Kosmetikforscher. So entpuppte es sich auch bei den Arbeiten von Stefan Gallinat als einer der Dreh- und Angelpunkte der Hautalterung. Gallinat sucht in den Labors der Beiersdorf AG in Hamburg nach den molekularen Unterschieden zwischen dem Bindegewebe junger und alternder Haut. Dabei bedient er sich der DNA-Chiptechnologie, mit deren Hilfe er in einem Arbeitsgang die Aktivität von Hunderten von Genen untersucht (siehe Spektrum der Wissenschaft, 6/2002, S. 62). So kann er schnell erkennen, welche eher in der jungen oder eher in der reifen Körperhülle aktiv sind oder ruhig gestellt werden. »Das sind natürlich eine ganze Menge Unterschiede, und die Herausforderung besteht darin, die relevanten Kandidaten zu identifizieren«, erklärt Gallinat. Sein besonderes Augenmerk gilt dabei der bereits er-

wähnten Matrixmetalloproteinase I. Sie nimmt in der alternden Haut deutlich zu, und man erkennt einen klaren Zusammenhang zwischen der Aktivität des zugehörigen Gens, dem Verlust an Kollagen und einer faltigen, lederartigen Haut. Gallinat und sein Team haben es sich zur Aufgabe gemacht, noch mehr solcher Schlüsselenzyme zu finden oder am besten gleich eine zentrale Schaltstelle, die sämtliche Alterungsprozesse der Haut in Gang setzt – egal ob sie nun genetisch bedingt sind oder durch Umweltfaktoren ausgelöst werden. »Durch einen solchen Schalter könnten wir das Problem an der Wurzel packen«, sagt Gallinat.

Er ist nicht der Einzige, der in Sachen Hautalterung auf Genchips setzt. So leitet auch Christos Zouboulis von der Charité in Berlin gemeinsam mit Stefan Schreiber von der Universität Kiel ein großes Screeningprojekt, das der Molekularbiologie des Alterns auf die Schliche kommen soll. Unter anderem konzentriert sich Zouboulis' Team dabei auf den Hormonstoffwechsel der weiblichen Haut. Während der Wechseljahre, wenn die Östrogenproduktion der Eierstöcke versiegt, stellen die Talgdrüsen der Haut teilweise über einen gewissen Zeitraum das weibliche Geschlechtshormon weiter her und verzögern dadurch den Alterungsprozess der Haut – wie, ist bislang unklar. »Auf diese Idee sind wir durch die Diskussion um die Hormonersatztherapie gekommen«, so Sabine Fimmel, Biochemikerin in Zouboulis' Team. In großen US-Studien zu dieser künstlichen Hormonzufuhr wurde nämlich immer wieder beobachtet, dass die Haut der behandelten Frauen länger frisch aussah. »Wir wollen nun herausfinden, welche Gene – und damit welche Stoffwechselwege – durch die Östrogenproduktion in der Haut angeregt werden«, erklärt Fimmel, »und natürlich auch, wie sie sich beeinflussen lassen.«

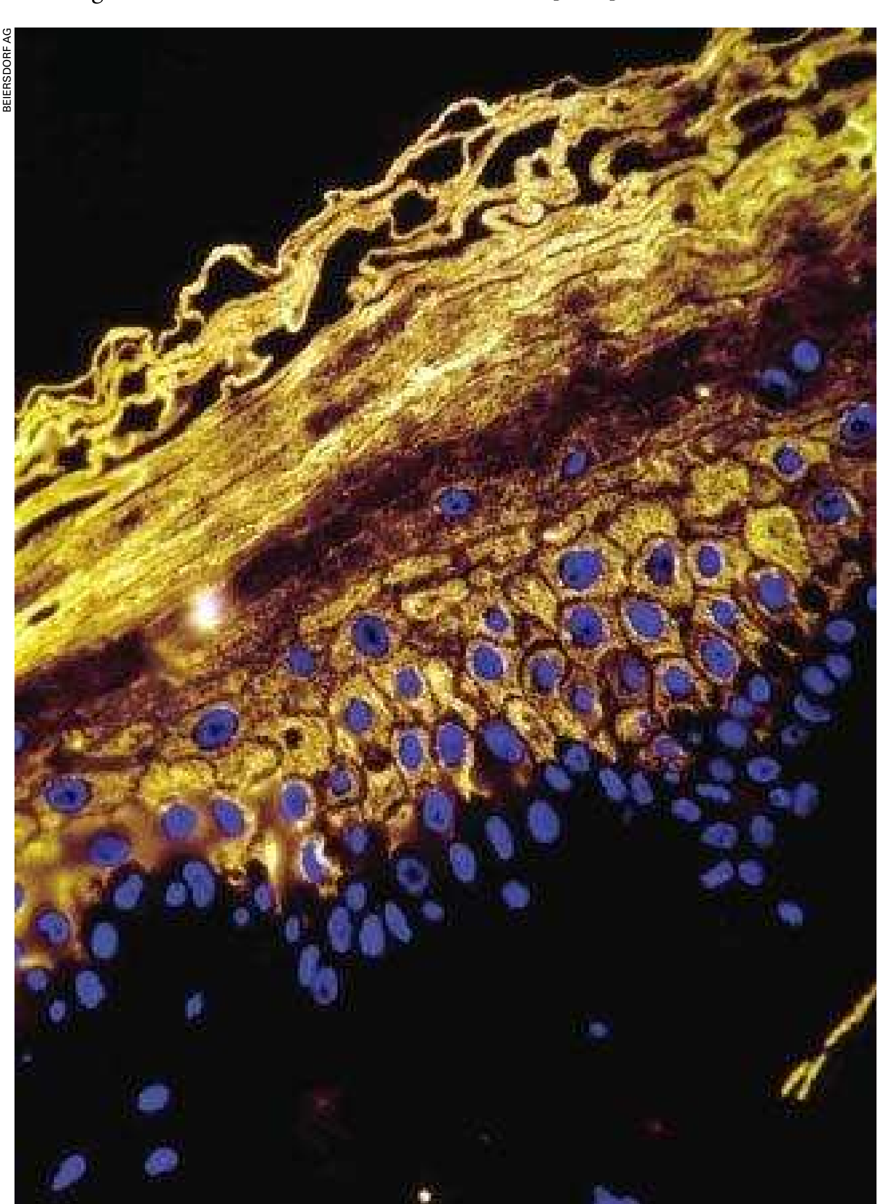
Einen ganz anderen Ansatz als seine Kollegen verfolgt Thomas Blatt, der wie Stefan Gallinat in den Hautlabors der Beiersdorf AG forscht. Denn nicht nur Veränderungen der DNA oder der Genexpression lassen uns alt aussehen. Blatt widmet sich dem Energiehaushalt der Hautzellen. Er hat festgestellt, dass die alternde Körperhülle regelrecht »schlapp macht«: Ihr mangelt es an einem wichtigen Energiespeichermedium, dem Kreatin. »Die Bedeutung von Kreatin war für Muskelzellen schon lange bekannt. Dass es auch in der Haut eine Rolle spielt, ist relativ neu«, erzählt Blatt. Das Molekül hat sich als äußerst effizienter Energiespeicher entpuppt, den die Zelle immer dort nutzen kann, wo er gerade benötigt wird. Dabei ist es übrigens den anderen Vorratsmolekülen weit überlegen.

Kreatin aus der Tube

Wahrscheinlich gelangt die Substanz über den Blutkreislauf in die Hautzellen. Mit zunehmendem Alter wird aber die Durchblutung schlechter – und damit auch der Kreatintransport.

Blatts Antwort auf dieses Problem: Er verpackt Kreatin in eine Creme und füttert so nach, was auf natürlichem Weg nicht mehr ans Ziel kommt. »Das funktioniert ganz hervorragend«, schwärmt der Forscher. »Die notwendigen Transportmechanismen, die das Speichermolekül in die Zelle bringen, sind ja in der Haut vorhanden.« Die Früchte seiner Arbeit gibt es mittlerweile schon – in eine Cremetube verpackt – zu kaufen. Für Blatt ist damit aber noch nicht Schluss: »Wir tüfteln immer weiter an der Zusammensetzung unserer Produkte, etwa an Kombinationen von Kreatin mit anderen Molekülen, um dadurch einen optimalen Effekt für die Haut zu erzielen.« Ein Kandidat dafür ist beispielsweise das Coenzym Q10, das bei der Energiegewinnung in den Mitochondrien, den Kraftwerken der Zelle, eine Rolle spielt, aber auch als Antioxidanz vor schädlichen freien Radikalen schützt. Von ihm verspricht man sich einen Schutz vor Faltenbildung und dem Verlust der Elastizität. ▷

Jedes Kosmetikum, das etwas in der Haut bewirken soll, muss zunächst die verhornte äußere Schutzschicht (goldgelb markiert) durchdringen, um zu lebenden Zellen (Kerne blau gefärbt) zu gelangen.


BEIERSDORF AG

▷ Was unseren Kopf ziert, wächst im so genannten Follikel, und dort unterhalb der Talgdrüse fand Ulrike Blume-Peytavi vor wenigen Jahren einen Hoffnungsträger für alle von der Glatze bedrohten Menschen: Stammzellen. Die Leiterin des Klinischen Forschungszentrums für Haare und Hautphysiologie an der Klinik für Dermatologie der Berliner Charité untersucht, wie diese nach oben wandern und die Epidermis der Haut bei Verletzung heilen, oder sich nach unten in die Haarzwiebel ablassen, dort zu Papillenzellen werden, die neues Haar wachsen lassen und die Pigmentierung steuern. Gelänge es, diese potenten Zellen bei Bedarf mit Wachstumsfaktoren anzuregen, wären Glatze und graues Haar Vergangenheit.

Doch der Weg dahin ist lang. »Haarwachstum ist ein komplizierter Mechanismus«, sagt Blume-Peytavi. Bis zu zwanzig verschiedene Zellpopulationen seien beteiligt, die nach einem noch geheimen Drehbuch ihren Auftritt haben. Weltweit sind zahlreiche Kandidatenmoleküle in der Pipeline, die die Zellen aktivieren oder auch bremsen sollen. Das Rezept für den Cocktail aus Wachstumsfaktoren ist Betriebsgeheimnis des jeweiligen Forschers. Noch hat keiner die optimale Zusammensetzung gefunden, aber Ulrike Blume-Peytavi rechnet in zwei bis drei Jahren mit ersten klinischen Versuchen.

Taxi zum Follikel

Während an den Fahrgästen eifrig geforscht wird, sind die Taxis zu den Zielorten im Haarfollikel bereits fertig. An der Charité experimentiert das Team von Blume-Peytavi mit Mikrosphären aus Polystyren. Die Kunststoffkügelchen haben einen Durchmesser von 0,75 bis 1,5 Mikrometern und sehen aus wie ein Schwamm. In den Poren sollen einmal die zu transportierenden Wachstumsfaktoren Platz finden. Vorerst sind die molekularen Taxis in den Reagenzglasversuchen mit Fluoreszenzfarbstoffen beladen, die unter dem konfokalen Lasermikroskop sichtbar machen, wo die Polystyrenkügelchen ihren Inhalt freisetzen. Die Charité-Forscher haben herausgefunden, dass sich über deren Durchmesser die Eindringtiefe steuern lässt: Je kleiner die Kügelchen, umso weiter gelangen die Farbstoffe. Mittlerweile schaffen es die Berliner, etwa die Hälfte in der richtigen Tiefe zu entladen. Die Kügelchen sollen dann vom wachsenden Haar wieder nach draußen transportiert und beim Waschen abgespült werden.

Mit Geduld und viel Geld kann man schon heute neue Haare züchten und transplantieren. Colin Jahoda von der englischen Universität Durham hat aus seinen Haaren dermale Papillen entnommen und seiner Frau Amanda Reynolds in den Unterarm gespritzt. Auf ihrem Arm wuchsen nach drei Wochen neue Haare, die genetisch eindeutig männlich waren. Zu einer Abstoßung kam es dabei nicht. Eine Erklärung dafür könnte laut Jahoda sein, dass die Haarzellen einen »privilegierten Immunstatus« besitzen. Ob sich diese Methode jemals durchsetzen wird, ist fraglich. Zwar lassen sich aus einer Hand voll Lederhaut-Papillen drei Millionen Zellen erzeugen, doch nicht aus allen wachsen Haare. Unklar ist auch, wie lange die Haarfollikel überleben. Der größte Nachteil: Die Haare wachsen in unterschiedliche Richtungen – ob da eine Glatze nicht besser aussieht? ◁




Stefanie Reinberger, promovierte Biologin und Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg, betrachtet ihre ersten Fältchen noch mit Gelassenheit.
Bernd Müller, Physiker und Wissenschaftsjournalist in Esslingen, schwört auf Nivea-Creme.

NATURSTOFFE

Der Natur auf der Spur

Die kosmetische Industrie setzt verstärkt auf Pflanzen, Bakterien und Meerestiere als Wirkstoff-Lieferanten.

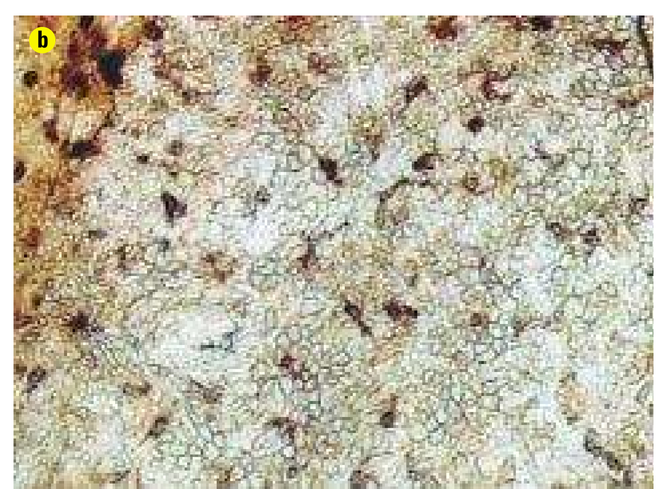
Von Frank Frick

Letztes Frühjahr schaffte der Wirkstoff Ectoin den Sprung gleich in mehrere Kosmetikprodukte: Shiseido aus Japan und Bioderma aus Frankreich präsentierten neue Sonnenschutzmittel, das Unternehmen Annemarie Börlind ein neues Anti-Aging-Serum mit dieser Substanz. Alle drei Kosmetikfirmen haben zwar beim Darmstädter Chemie- und Pharmakonzern Merck eingekauft, doch erstmals hergestellt hat die ringförmige Aminosäure kein findiger Industrieforscher, sondern die Natur: Bakterien produzieren sie, um in Salzseen und Salzwüsten besser überdauern zu können.

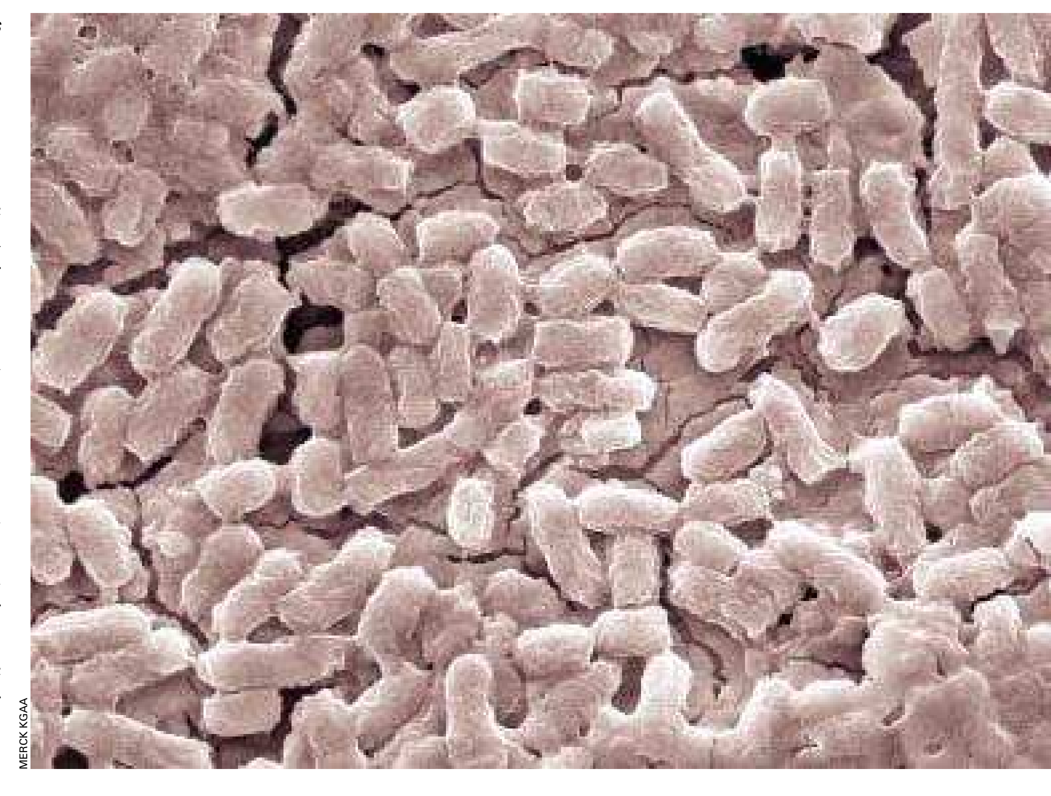
Wie Ectoin ins Badezimmerregal gelangte, ist eine Geschichte, die in der Kosmetikbranche gerne erzählt wird. Anfang der 1980er Jahre entdeckte der Mikrobiologe Erwin A. Galinski, heute an der Universität Bonn, im Wadi Natrun, einem ausgetrockneten Flussbett in der Nähe der ägyptischen Hauptstadt Kairo, das Bakterium *Ectothiorhodospira*

MERCK KGAA





Die Bakterien der Art *Halomonas elongata* produzieren den neuen Wirkstoff Ectoin in großen Mengen.



halochloris. Er ging der Frage nach, wie es den hohen Salzkonzentrationen und der Hitze trotzen kann. Dabei stieß er auf eine bis dahin unbekannte Substanz, das Ectoin. Der Gedanke lag nahe, dass sie in der Lage sein könnte, auch menschliche Zellen vor Umwelteinflüssen zu schützen.

Später brachten Forscher der Wittener bitop AG natürliche Bakterienstämme durch hohe Salzkonzentrationen dazu, Ectoin in großen Reaktionsgefäßen in industriell verwertbaren Mengen herzustellen. Wird der Salzgehalt in der Nährlösung anschließend verringert, setzen die Bakterien das Produkt frei. Die Merck KGaA erwarb die Lizenzen für dieses Verfahren und bietet den Wirkstoff seit Herbst 2000 der Kosmetikindustrie an. Zuvor hatten die Unternehmensforscher nachgewiesen, dass Ectoin tatsächlich Reparatur- und Schutzmechanismen unterstützt, mit denen die Haut auf schädliche ultraviolette Sonneneinstrahlung und andere Stressfaktoren reagiert. Außerdem stabilisiert der famose Wirkstoff offenbar den natürlichen Feuchtigkeitshaushalt der Zellen.

Starkes Wachstum in einem stagnierenden Markt

Ectoin ist nur ein Beispiel für unzählige kosmetische Substanzen natürlichen Ursprungs. Forscher gelangen durch systematisches Variieren von Strukturelementen zu neuen Wirkstoffen. »Diese Synthese- und Optimierungsarbeit hat die Natur im Lauf der Evolution für uns schon erledigt«, begründet Roland Breves, Leiter der Hygiene-Forschung bei Henkel, warum Wissenschaftler in der Natur besonders häufig fündig werden. Außerdem übertrifft die Natur den Chemiker gelegentlich an Kunstfertigkeit, meint der Leiter der Kosmetikforschung bei Merck, Herwig Buchholz: »Natürliche Organismen stellen manche Stoffe her, die sich im Labor überhaupt nicht oder nur mit extrem hohem Aufwand synthetisieren lassen.«

Doch nutzt die kosmetische Industrie die Natur nicht nur aus wissenschaftlichen Gründen als Rohstoffquelle, sondern auch, weil sich solche Kosmetik gut verkaufen lässt. So verzeichnete das Geschäft mit kontrolliert natürlichen Produkten nach Angaben des zuständigen Bundesverbands in den vergangenen Jahren Wachstumsraten von über zehn Prozent – bei einem in Deutschland insgesamt stagnierenden Kosmetikumsatz. Der Begriff »kontrolliert natürliche Kosmetik« ist dabei allerdings nicht gleichzusetzen mit jedem Kosmetikprodukt, das Aktivstoffe natürlichen Ursprungs enthält. Firmen, die als Zulieferer der Kosmetikindustrie Wirkstoffe verkaufen, spüren den Trend: »Konsumenten wenden sich natürlichen Inhaltsstoffen zu – weg von Stoffen aus genetisch modifi- ▷

UV-Licht schadet den so genannten Langerhans-Zellen, die im Immunsystem der Haut eine wichtige Rolle spielen. Der neue Wirkstoff Ectoin vermag dies zu verhindern, wie das Experiment zeigt (die Langerhans-Zellen wurden angefärbt): Die nichtbestrahlte Probe (a) unterscheidet sich nicht von der dem UV-Licht ausgesetzten, aber geschützten (d). Hingegen ist die Zahl dieser Zellen in der Haut eines Probanden stark reduziert, wenn sie gänzlich ungeschützt (b) oder nur mit Scheinpräparaten behandelt war (c).





INTERVIEW

Die Nadel im Heuhaufen

Wie Computer und Naturheilkundler helfen, neue kosmetische Substanzen zu finden, erläutert Herwig Buchholz, Leiter der Kosmetikforschung bei Merck in Darmstadt.


MERCK KGAA

Herwig Buchholz (stehend, links) setzt auf kombinatorische Chemie.

Spektrum der Wissenschaft: Was sind die wesentlichen Unterschiede zwischen Kosmetik- und Arzneimittelforschung?
Herwig Buchholz: Ein Arzneistoff braucht für den Weg vom Labor in die Apotheke mehr als zehn Jahre. Bei einem Kosmetikum darf die Entwicklungszeit höchstens vier Jahre betragen, denn die Trends in der Branche verändern sich schnell. Außerdem werden bei pharmazeutischen Wirkstoffen manche Nebenwirkungen unter Umständen geduldet, bei den Inhaltsstoffen von Kosmetika dagegen nicht.
Spektrum der Wissenschaft: Pharmaforscher erzeugen mit Hilfe der kombinatorischen Synthese in kurzer Zeit Zehn- oder gar Hunderttausende von Substanzen. Diese werden dann mit Hilfe von Robotern im Hochdurchsatz-Verfahren auf ihre Wirkung getestet. Praktiziert das auch die Kosmetikindustrie?
Buchholz: Ja, wenn auch mit weniger Substanzen. Man stellt mit der kombinatorischen Chemie beispielsweise zahlreiche Stoffe her, die sich von einem einzigen Basismolekül – der Leitstruktur – ableiten. Die kann natürlichen Ursprungs sein, also beispielsweise aus einer Pflanze stammen. So versucht man, eine Substanz zu finden, die noch stärker als der Naturstoff wirkt, beispielsweise mit Hilfe von Chips, auf denen sich hautrelevante Gene befinden. Man stellt fest, welche Stoffe die Aktivität dieser Gene beeinflussen.
Spektrum der Wissenschaft: Welche anderen Strategien gibt es, um neue kosmetische Aktivstoffe zu finden?
Buchholz: Eine davon klang schon an: die Suche in Pflanzenextrakten. Bei Merck haben wir weltweite Kontakte zu Naturheilern und Krankenhäusern, die nur Pflanzen verwenden. So erhalten wir wertvolle Hinweise, welche Extrakte eine bestimmte Wirkung haben könnten. Wir zerlegen diese in ihre Anteile und testen sie. Unser Bestreben ist es, die Wirkung möglichst auf Reinsubstanzen zurückzuführen.
Spektrum der Wissenschaft: Welche Hilfen bietet Ihnen der Computer?
Buchholz: Wie in der Pharmaforschung nutzen wir tatsächlich auch das so genannte In-silico-Design, um neue Substanzen zu entwickeln. Mit Hilfe komplizierter Computerprogramme suchen wir nach Molekülen, die auf Grund ihrer räumlichen Struktur an Enzyme ankoppeln können, die in der Haut eine Rolle spielen. Auf diese Weise erhalten wir potenziell wirksame Molekülstrukturen. Diese Kandidaten werden dann weiter überprüft. Zum Beispiel schrumpft ihre Anzahl durch den Abgleich mit Patentdatenbanken und Programmen zur Abschätzung der Toxizität. Danach erst beginnt die Laborarbeit, bei der wir die vom Computer vorgeschlagenen Moleküle synthetisieren und testen.

Interview: Frank Frick

▷ zierten Organismen und anderen Substanzen mit negativem Image.« Das jedenfalls hat die Cognis-Tochtergesellschaft Laboratoires Sérobiologiques festgestellt.

Das Gute an der Sache: Das Reservoir an Naturstoffen scheint nahezu unerschöpflich, gibt es weltweit immerhin mindestens 250 000 höhere Pflanzenarten, die sich mit Hilfe spezieller Stoffwechselprodukte in ihrer jeweiligen Umwelt behaupten – hinzu kommen noch unzählige Moose, Algen und Pilze. Jedoch gibt es auch eine Kehrseite für die Kosmetikforscher: Viele Pflanzen stehen unter Artenschutz, viele lassen sich nicht anbauen. Zudem schwanken Wirkstoffgehalte in Pflanzen von Woche zu Woche oder gar von Tag zu Tag. Da hilft es manchmal nur, die Wirkung eines Extrakts auf eine oder wenige Substanzen zurückzuführen und diese dann im Labor nachzubauen – eine oft Jahre dauernde, kostspielige Arbeit.

Doch noch birgt die Natur genug Schätze, die einfacher gehoben werden können – wenn man nur weiß, wonach genau man sucht und wie man dabei vorgehen muss. So kamen Mitarbeiter der Zentralen Forschung von Henkel auf die Idee, ein aus der Ernährungsbranche bekanntes Konzept auf die Haut zu übertragen. Die so genannte Präbiotik beruht auf der Annahme, das sich die gezielte Förderung nützlicher Bakterien positiv auf eine Körperregion auswirkt. Im Herbst 2002 begannen die Forscher, über hundert Extrakte und Stoffe auf ihre Wirkung hin zu untersuchen, und wurden bei einem »Cocktail« aus Ginseng, Kiefernadeln und Schwarzer Johannisbeere bald fündig – alles wohl bekannte und weit verbreitete Quellen für medizinische Wirkstoffe.

Zum raschen Sucherfolg trugen neue molekularbiologische Methoden wesentlich bei, mit denen die verschiedenen Bakterienarten auf der Haut anhand charakteristischer DNA-Sequenzen identifiziert und für die Forscher sichtbar gemacht wurden. Schon im März 2004 kamen dann erste Gesichtspflegeprodukte auf den Markt, die die neue Wirkstoffkombination enthielten. ◁

Frank Frick ist promovierter Chemiker und freier Wissenschaftsjournalist in Bornheim bei Bonn. Er berichtet vor allem über medizinische und technische Themen.



TESTVERFAHREN

Pflichtenheft für Haut und Haar

650 Forscher und 6000 Probanden entwickeln und testen bei der Firma Beiersdorf neue Kosmetikprodukte. Dabei kommt modernste Messtechnik zum Einsatz.

Von Bernd Müller

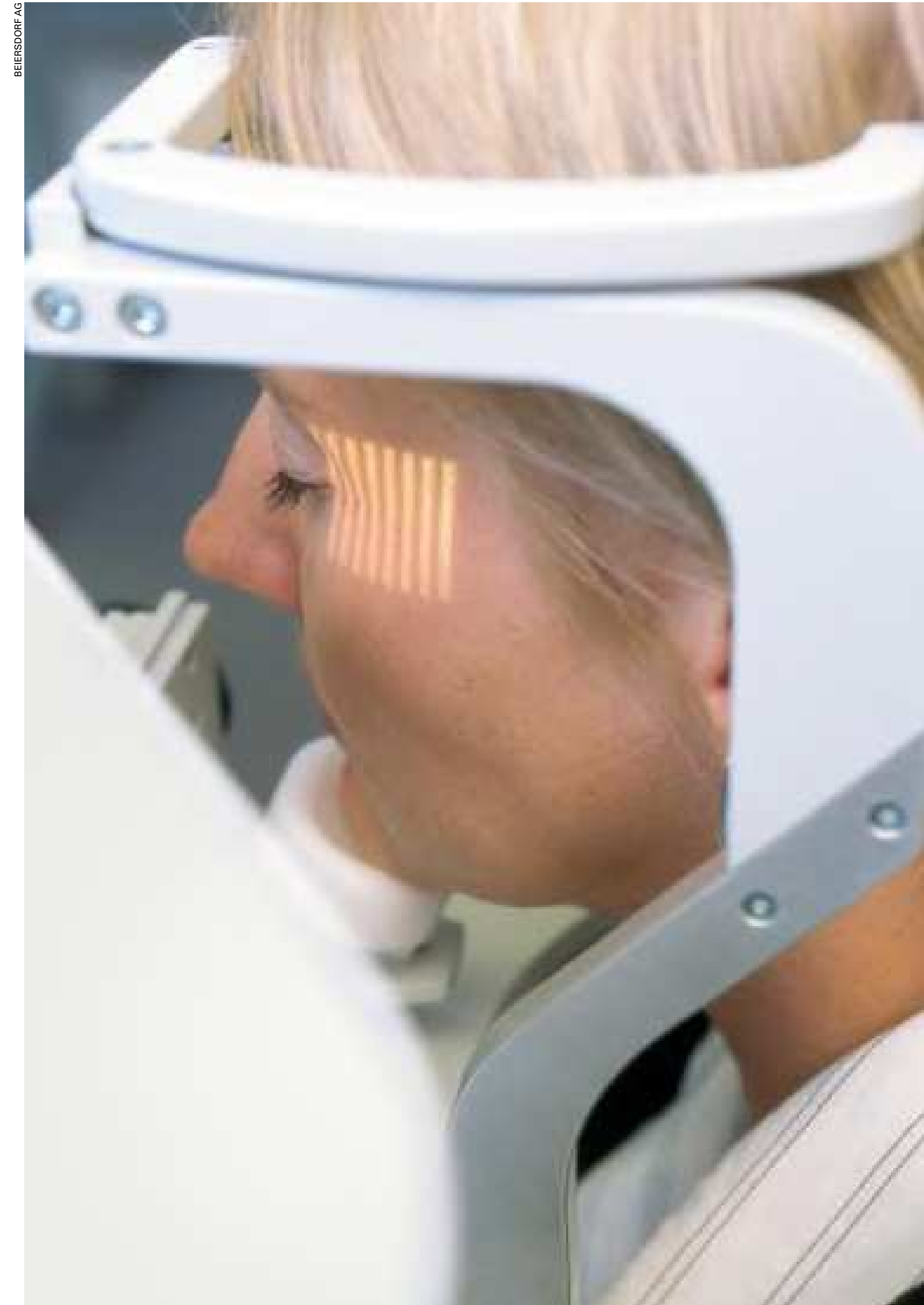
Wir produzieren Seife und verkaufen Hoffnung.« Niemand hat das Geschäft mit Kosmetikprodukten besser auf den Punkt gebracht als Charles Revson (1906–1975), Gründer des amerikanischen Kosmetikkonzerns Revlon. Diese Hoffnung ist Kunden 201 Milliarden US-Dollar wert – so viel wird heute jedes Jahr weltweit für Kosmetikprodukte ausgegeben. In den Anfängen des Revlon-Konzerns war der Firmengründer zugleich auch Versuchskaninchen: Revson testete zum Beispiel neue Nagellacke zuerst auf den eigenen Fingernägeln.

Heute wäre das undenkbar. Die Beiersdorf AG in Hamburg hat eigens ein Probandenzentrum gebaut, um neue Kosmetikrezepturen nach wissenschaftlichen Kriterien zu testen. 6000 Freiwillige sind in der Datenbank gelistet, jeder wurde zuvor in Kooperation mit dem Universitätsklinikum Hamburg-Eppendorf gründlich untersucht.

Mit einer Chipkarte melden sich die Testpersonen jeweils an einem Computerterminal an und begeben sich vor den Versuchen für 40 Minuten in einen Warteraum. Dort herrschen immer 21,5 Grad Celsius und 45 Prozent Luftfeuchtigkeit – nichts soll später die Messungen verfälschen.

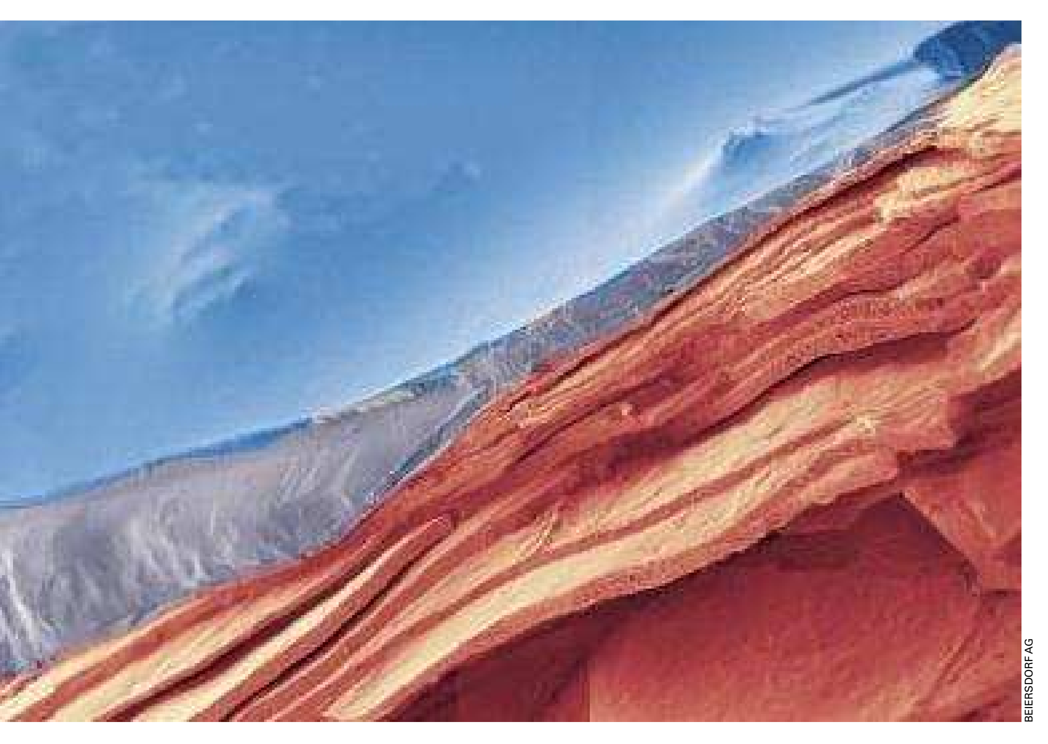
Zu den 35 klimatisierten Testräumen gehören »Hotrooms«, in denen die Probanden Wattepads unter den Achseln vollschwitzen. Die Pads werden gewogen und von empfindlichen Nasen einem Geruchstest unterzogen. In anderen Versuchen ermitteln die Mitarbeiter des Zentrums die Tiefe von Augenfalten – wirkt die neue Creme oder nicht? Dazu wird der Kopf des Probanden fixiert und die betreffende Partie dann in Sekundenschnelle vermessen.

»Das Scan-Verfahren haben wir zufällig auf der Hannover Messe entdeckt, wo wir immer nach neuen Techniken für die kosmetische Dermatologie recherchieren«, erzählt Joachim Ennen, Leiter des Probandenzentrums. »Primos« wurde von der GF Messtechnik Berlin entwickelt, um die Rauigkeit von Werkstücken in der Automobilproduktion zu erfassen. Etwa 800 000 Spiegel, jeder mit einer Kantenlänge von 16 Mikrometern, projizieren nun zirka 20 Mikrometer feine Streifen auf Gesichter. Eine Software errechnet aus Schattenwurf und Verzerrung den Verlauf, die Tiefe und das Volumen von Falten. Außerdem bringt sie Aufnahmen zur Deckung, die über Monate hinweg entstanden. So ist es für die ▷



BEIERSDORF AG

Ein Streifenmuster verrät, wie gut eine Creme gegen Falten hilft – aus den Verzerrungen lässt sich die Topografie der Oberfläche berechnen.



Mit einer besonderen Gefriertechnik wurde diese Hautbiopsie fixiert. Die blau eingefärbte Schicht ist Sonnencreme, darunter liegen dachziegelartig die Hautschuppen übereinander.

Hautexperten leicht, die Wirksamkeit einer Creme zu messen.

Etwa 1600 Tests unternimmt das Probandenzentrum pro Jahr, einige davon auch mit Konkurrenzprodukten. Am Anfang jeder Versuchsreihe steht eine Hypothese, die – basierend auf den wissenschaftlichen Erkenntnissen zu den einzelnen Wirkstoffen – später die Vermarktung bestimmen soll: »Diese Creme reduziert Falten um 20 Prozent« oder »Das Deo wirkt zwölf Stunden«. Ein Prüfplan gibt dem Laborpersonal vor, wie der Test abzulaufen hat, Statistiker werten die Ergebnisse aus. Wenn das Produkt nicht halten kann, was die Hypothese verspricht, müssen die Produktentwickler und eventuell sogar die Forschungsabteilungen die Mischung oder einzelne Substanzen nochmal verbessern. »Bis zu 20 Prozent der Substanzen oder Mischungen können in den In-vivo-Studien durchfallen, je nachdem wie neu und entsprechend unbekannt ein Wirkstoff ist«, schätzt Laborleiterin Urte Koop. Allein die letzte Phase, die Produktentwicklung, dauert anderthalb Jahre, in denen die genaue Formulierung hinsichtlich Geruch, Farbe oder Konsistenz festgelegt wird.

»Die Kosmetikforschung ist verglichen mit der Dermatologie, die sich mit Hautkrankheiten beschäftigt, sehr weit«, befindet Klaus Peter Wittern, Leiter der Forschung und Entwicklung bei Beiersdorf. Intakte Haut sei viel komplexer, die Beeinflussung durch Kosmetikprodukte geringer als bei Medikamenten und damit auch schwieriger zu messen. Ohne die Verdunstungsbarriere unserer Haut könnten wir nicht an Land leben, sondern würden jeden Tag hundert Liter Wasser verlieren. Für Wittern ist die Haut das faszinierendste Organ überhaupt: Auf 150 Mikrometer Dicke könne man die Geburt neuer Hautzellen aus Stammzellen ebenso beobachten wie den Zelltod. Die Herausforderung: Eigentlich ist die Haut nur auf etwa vierzig Jahre ausgelegt, die Menschen leben inzwischen aber im Schnitt doppelt so lang.

Momentaufnahmen des Lebens

Rund 650 Personen arbeiten in den Forschungslabors bei Beiersdorf daran, diesen Konflikt zu lösen. Die meisten sind Biologen und Chemiker, aber auch Physiker gehören dazu. Wie Roger Wepf, der neue Mikroskopiertechniken entwickelt. Unter anderem hat er eine Gefriertechnik für das Kryo-Rasterelektronenmikroskop zur Praxisreife geführt. Die Hautproben stanzt sich der Forscher mitunter selbst aus dem Unterarm.

Die Herausforderung besteht darin, Zellen für die Untersuchung erstarren zu lassen, ohne dass Eiskristalle sie zerstören. Wepf gelingt das durch Hochdruckgefrieren. Dabei wird die Hautprobe in zehn Millisekunden auf 2200 Bar komprimiert und dann mit flüssigem Stickstoff beschossen. Unter dem hohen Druck gefriert das Wasser in der Probe erst bei minus 90 Grad Celsius und erstarrt amorph. In weniger als 50 Millisekunden ist die Probe dann auf die Endtemperatur von minus 160 Grad Celsius abgekühlt. Das geht so schnell, dass die Hautprobe quasi lebend in einer Momentaufnahme beobachtet werden kann. Sie lässt sich auch brechen, um zum Beispiel zu sehen, wie tief Emulsionen aus Wasser und Öl eingedrungen sind. Auf diese Weise wurde kürzlich auch entdeckt, wie Hautschuppen in der obersten Hautschicht mechanisch ineinander verhakt sind.

Wenn möglich, versuchen die Wissenschaftler die Eigenschaften der Haut in vivo, also am lebenden Objekt, zu erforschen. Eine Möglichkeit, die Schutzwirkung von Sonnencremes zu testen, ist die Bestimmung so genannter Biophotonen. Jede Zelle gibt infolge von Stoffwechselprozessen solche Photonen ab, die Wellenlängen reichen vom Radiowellen- bis in den sichtbaren Bereich. Die Strahlung ist allerdings so schwach wie



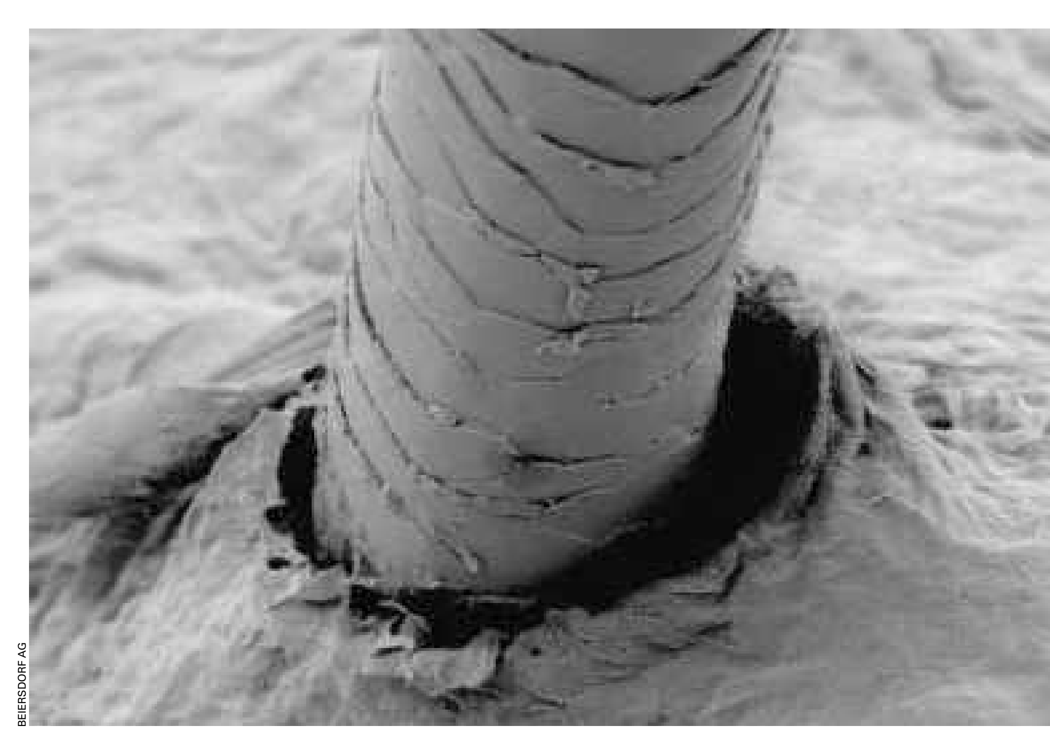
Zu den funktionellen Einheiten im komplexen Aufbau der Haut zählen die Papillen: fingerförmige Einstülpungen, welche die Lederhaut mit darüberliegenden Schichten verzahnen. Alterungsprozesse verringern ihre Anzahl, sodass die Erfassung der Papillen, etwa mit der konfokalen Laserrastermikroskopie, Schlüsse auf die Wirksamkeit von Pflegeprodukten erlaubt.

bei einer Kerze, die aus zehn Kilometer Entfernung betrachtet wird, und kann nur mit hoch empfindlichen Photodetektoren gemessen werden. Ultraviolettes Licht der Sonne oder Ozon fördert in den Zellen die Bildung von freien Radikalen, die chemische Bindungen aufbrechen und so die Hautalterung beschleunigen. Die Radikale verlieren ihre Energie an der Zellmembran, dabei entstehen Wärme und zusätzliche Biophotonen. Um diese zu messen, wird in einem dunklen Raum die Haut der Probanden für acht Sekunden mit starkem UV-Licht bestrahlt, danach zählen Photodetektoren eine Minute lang die Photonen, die beim Abbau der Radikale frei werden.

Kopfschmuck Haar im Dauerstress

Besonders interessant für die Kosmetikforscher sind die Papillen, fingerförmige Gebilde, die in etwa 100 Mikrometer Tiefe aus der Dermis genannten Lederhaut in die darüberliegende Oberhaut (Epidermis) ragen und beide miteinander verzahnen (siehe Grafik auf S. 83). Mit zunehmendem Alter nimmt ihre Anzahl pro Fläche ab und damit auch die Festigkeit der Haut. Papillen sind besonders gut mit der konfokalen Laserrastermikroskopie sichtbar zu machen, die auch tiefere Hautschichten abbildet. Lochblenden lassen nur Licht hindurch, das von einem Punkt des Objekts stammt. Durch schrittweise Aufnahme einzelner Punkte entsteht ein vollständiges Bild des Objekts, das deutlich schärfer ist als bei herkömmlichen Lichtmikroskopen. Neuerdings kommt ein Laser zum Einsatz, der die Lichtausbeute erkennbar erhöht und die Messzeit drastisch verkürzt. »Das Gerät schafft zwölf Bilder pro Sekunde und ist damit in-vivo-tauglich«, erklärt Wepfs Mitarbeiter Sören Jaspers.

Neu im Gerätepark ist das Multiphotonenmikroskop. Es fokussiert 80 Millionen Mal pro Sekunde Laserimpulse von etwa 100 Femtosekunden in winzige Punkte in die Haut. Wenn dort zwei Photonen innerhalb einer Femtosekunde eintreffen, addiert sich ihre Energie. Infrarotlicht kann so zum Beispiel Fluoreszenzfarbstoffe anregen, die sonst nur auf UV-Strahlung reagieren. Das schont das Gewebe und hat noch einen weiteren Vorteil: Für infrarotes Licht ist die Haut fast durchsichtig, so kann noch Gewebe in bis zu 500 Mikrometer Tiefe beobachtet werden. Regt man mehrere Farbstoffe gleichzeitig an, lassen sich sogar 3-D-Bilder erzeugen. Noch fehlt der Apparatur allerdings die medizinische Zulassung für In-vivo-Messungen.


BEIERSDORF AG

Wie bei diesem Haar sollten die äußeren Zellen dachziegelartig ineinander stecken. Nur dann ist es elastisch und stabil.

Leichter haben es die Kollegen im Labor für Haar und Kopfhaut – sie brauchen bei ihrer Grundlagenforschung keine lebenden Probanden, sondern kommen mit Haarbüscheln aus. Die Strähnen aus Echthaar werden mechanisch beansprucht, um ihre Widerstandskraft zum Beispiel beim Kämmen zu testen. Ein wichtiges Maß ist die Rauigkeit der Oberfläche. Das Haar besteht aus abgestorbenen Hautzellen, die wie Dachziegel ineinander stecken. Kaputte Haare fühlen sich stumpf an und glänzen weniger, weil diese Ziegel nicht mehr glatt anliegen, sondern abstehen. Beim Kämmen braucht man dann mehr Kraft und es werden mehr Partikel abgerieben, was dem Haar weiter zusetzt.

Thomas Schmidt-Rose und seine Mitarbeiter nutzen verschiedene Methoden, um diese Phänomene wie im Zeitraffer zu beobachten: Bei der Gleitkraftmessung wird ein Metallschuh über ein Haarbüschel gezogen und die nötige Kraft bestimmt. Oder man spannt es senkrecht ein, kämmt über eine mechanische Vorrichtung und misst wieder die Kraft. In einer anderen Apparatur kann auch gedehnt und zerrissen werden – auch das gibt Auskunft über den Zustand des Haars. Geprüft wird, welche Wirkung Shampoos oder Spülungen haben, die es mit einem dünnen Film umhüllen und es glatter und glänzender machen.

Die Erosion der Haare misst Schmidt-Rose in einem computergesteuerten Automaten: Darin ist ein kurzes Büschel eingespannt, das von einem handelsüblichen Kamm in immer gleichen Bewegungen bearbeitet wird. In einen Trichter fallen abgeriebene Partikel. Sie werden ausgespült und gefiltert – je mehr zurückbleiben, umso angegriffener ist das Haar.

Es gibt viele Ansätze, die Strapazierfähigkeit und Lebensdauer unseres Kopfputzes zu erhalten. Zum Beispiel sucht das Laborteam nach Wirkstoffen, die den Stoffwechsel der Haarwurzel verbessern oder Wachstumsphasen gezielt verlängern. Welche in der Pipeline sind, ist natürlich geheim, aber in den nächsten fünf Jahren sei mit Produkten zu rechnen. Einige Substanzen wirken bereits in vitro, zum Beispiel an Haarwurzeln, die in Kulturgefäßen wachsen, aber in vivo, am lebenden Menschen, sind sie noch nicht erprobt. ◁



Ein Kunstherz für den OP

Unter Einschaltung dieses Gerätes von dem VEB Medizintechnik Leipzig ist es möglich, bei Ausschaltung des Patientenherzens die Blutzirkulation durch den Körper für die Dauer der Operation aufrechtzuerhalten. Durch einen Katheter, der in den linken Vorhof eingeführt wird, wird das arterielle Blut abgesaugt. Die Pumpen des »Künstlichen Herzens« drücken dieses Blut in eins der großen Gefäße des arteriellen Systemkreislaufes … Das aus dem großen Kreislauf zurückfließende venöse Blut wird vor dem rechten Vorhof abgesaugt oder zur Sauerstoffaufladung über eine Lungenarterie in die Lunge gepresst … Die durchgeführten Tierversuche lassen die Hoffnung auf eine baldige Anwendung in der Humanchirurgie aufkommen. *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 8. Jg., Nr. 2, S. 74, Februar 1955)*



▲ Unter der Plexiglashaube des »Künstlichen Herzens« befinden sich vier Pumpen aus Glas.

Heilsamer Atomblitz

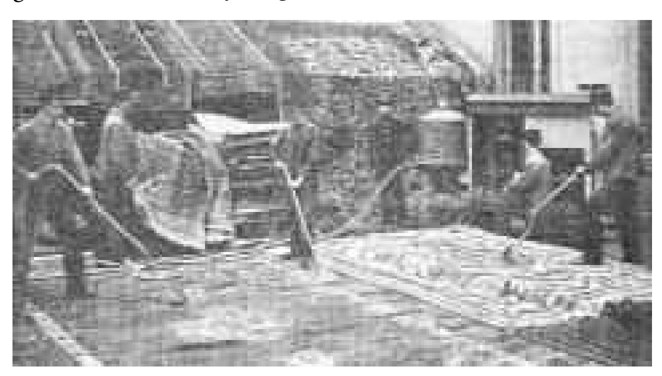
Bei der ersten deutsch-amerikanischen Konferenz für Aero-Medizin in Wiesbaden … behandelte Colonel Victor A. Byrnes die Einflüsse, die durch »Kernwaffenblitz« auf die Augen ausgeübt werden und bei der Explosion von Atomwaffen zu Verbrennungen der Netzhaut führen. Er berichtete von Versuchen, die mit 700 pigmentierten Kaninchen beim Abwurf einer Atombombe angestellt wurden … Die Veränderungen an den Augen führten zu Dauerschäden, die der Explosion von 20 000 Tonnen Sprengstoff gleichkommen … Aufsehen erregte seine Mitteilung, daß diese Ergebnisse der Forschung zu therapeutischen Maßnahmen verwendbar sind, um kleinere Tumoren am Auge durch Bestrahlung mit entsprechender Lichtenergie zu entfernen. *(Universitas, 10. Jg., Nr. 2, S. 113, Februar 1955)*

Mit Psychostimulans auf den Mount Everest

Die Besteigung des Mount Everest im Jahr 1953 war nur mit Sauerstoffgeräten möglich. Diese Geräte müssen etwa ab 7500 m Höhe benutzt werden … Der Bergsteiger Buhl überwand die gefährliche Zone nach Einnahme von Pervitintabletten auch ohne Sauerstoffgerät. Wieland untersuchte dieses Problem an Rhesusaffen. Die Tiere verloren bei 8% Sauerstoffgehalt (entsprechend 7500 m Höhe) das Bewußtsein. Nach vorheriger Pervitininjektion trat dies erst bei 6,5 bis 5,5% Sauerstoffgehalt ein (entsprechend 9000 bis 10 000 m Höhe). Pervitin verschiebt das Blutvolumen unter Bevorzugung der lebenswichtigen Organe Gehirn und Herz zu Lasten der Peripherie. *(Die Umschau, 55. Jg., Nr. 3, S. 90, Februar 1955)*

Pneumatische Entstaubung von Teppichen

Bisherige Methoden der Staubentziehung in Innenräumen sind nicht rationell, als der Staub … nur von einer Stelle zur anderen befördert wird … Der Apparat der Vacuum-Reiniger-Gesellschaft besteht aus einer Luftpumpe, die durch einen Motor angetrieben wird. An der Pumpe ist ein großer Luftbehälter angeschlossen, der im Innern einen Staubfilter enthält und an den … Gummischläuche mit … auswechselbaren Mundstücken angeschlossen werden. Die Pumpe erzeugt an dem Mundstück … eine starke Saugwirkung; durch einfaches Hin- und Herbewegen … wird der Staub aufgesaugt … Welche Mengen mit dem Vakuum-Reiniger entfernt werden, … läßt sich daran erkennen, daß eine Reinigung des Berliner Apollotheaters 202 kg Staub ergab. *(Buch der neuesten Erfindungen, S. 627, Februar 1905)*



▲ Starke Saugwirkung: Beim Großreinemachen im Apollotheater kam zentnerweise Staub zum Vorschein.

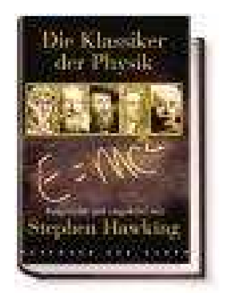
Das Wellenbad – eine neue Attraktion



Es bedarf keiner besonderen Betrachtungen über die grossen Vorteile und den erhöhten Genuss des Badens in bewegtem Wasser … Die Wellenerzeugung erfolgt bei vorliegender Erfindung durch Eintauchkörper oder einschwingende Flächen, welche durch motorische Kraft in rhythmische Bewegung versetzt werden. Der Boden des Wellen-Bassins steigt … strandförmig an, sodass Sturzwellen auftreten, wie am Strande des Meeres … Die Wellenhöhe kann auf jedes Mass reduziert werden … Die Wellenerzeuger können in alle Badeanstalten eingebaut werden, sei es in … Hallenbäder, Flüsse oder Binnenseen. *(Patent & Industrie, 16. Jg., Nr. 5, S. 67, Februar 1905)*

Astronomische Entdeckung

An der Existenz des von Mr. Perrine auf der Licksternwarte entdeckten sechsten Jupitermondes scheint nun jeder Zweifel ausgeschlossen zu sein, da der amerikanische Astronom inzwischen neue Beobachtungen dieses anscheinend recht schwierigen Objekts erhalten hat und da sich nachträglich herausstellte, daß der von Prof. M. Wolf in Heidelberg … photographisch in der Nähe des Planeten Jupiter aufgefundene kleine Planet 1905 … keineswegs mit dem neuentdeckten Jupitermonde, wohl aber mit dem schon seit 1875 bekannten kleinen Planeten Nr. 149, Medusa, identisch ist. *(Beilage zur Allgemeinen Zeitung, Nr. 44, S. 35, Februar 1905)*



WISSENSCHAFTSGESCHICHTE

Stephen Hawking (Hg.)

Die Klassiker der Physik

Ausgewählt und eingeleitet von Stephen Hawking

Hoffmann & Campe, Hamburg 2004. 1068 Seiten, € 49,90

Gut tausend Seiten dick, schön gedruckt auf gelblichem Papier – ein gewichtiger Brocken, ein passendes Geschenk. Mit Bestsellerautor Stephen Hawking als Gewährsmann und der berühmten Einsteinformel $E = mc^2$ auf dem Umschlag scheint der Verkaufserfolg garantiert. Aber hält der Inhalt, was die Verpackung verspricht?

Die ersten 300 Seiten (!) belegt eine Übersetzung des lateinischen Werks *De revolutionibus orbium coelestium* (»Über die Kreisbewegungen der Himmelskörper«) von Kopernikus aus dem Jahre 1543 – mit allem Drum und Dran: Lehrsätze über Kreissehnen und sphärische Dreiecke, dazwischen seitenlange Tabellen. Hat ein Korrektor all diese Zahlen kontrolliert? Welchen Unterschied macht es für heutige Leser, ob jede mit dem Originaltext übereinstimmt? Sie sind Teil einer umständlichen Beweisführung für eine Halbwahrheit: Kopernikus fand zwar als erster die richtige Konfiguration des Sonnensystems heraus, beharrte aber auf dem zeitgenössischen Irrtum, die Planetenbahnen seien vollkommene Kreise.

Stephen Hawking erläutert dies und manches andere zwar in seiner flott geschriebenen Einleitung auf rund fünf Seiten; allerdings hat ihm der Kopernikus-Spezialist Owen Gingerich eine Fülle von historischen Ungenauigkeiten und Fehlern vorgeworfen (»Nature« vom 13. Februar 2003) und Hawkings Einführung als »Desaster« bezeichnet.

Die Textstücke von Galilei, Kepler, Newton und Einstein sind kürzer und unterschiedlich gut lesbar. Galileis *Discorsi* behandeln Probleme der Mechanik in Dialogform und sind zumindest für physikalisch Interessierte unterhaltsam (bis auf geometrische Beweise und eine öde Tabelle). Man fragt sich allerdings, warum Hawking nicht den »Dialog über die hauptsächlichsten Weltsysteme« auswählte, dessentwegen Galilei als Verfechter des kopernikanischen Systems mit der Kirche in Konflikt geriet.

Keplers fünftes Buch aus der »Weltharmonik« wäre ohne die kurzen Anmerkungen, die Markus Pössel für die deutsche Ausgabe von Hawkings Kompendium zusammengestellt hat, vollkommen unverständlich. Kepler ordnet hier den Planeten platonische Körper, Bruchzahlen und musikalische Noten zu, und es mutet den heutigen Leser wie ein Wunder an, dass derart närrische Spekulationen – die, wie Hawking einleitend betont, auf höchst präzisen astronomischen Daten fußten – Kepler zur Entdeckung der nach ihm benannten Gesetze verhalfen.

Auch Newton quält im Stil seiner Zeit den modernen Leser mit umständlichen geometrischen Argumenten für sein berühmtes Gravitationsgesetz, bevor er ganz am Ende seiner *Principia* ein ungeheuer eindrucksvolles Bekenntnis zu einem persönlichen Gott ablegt, in dessen Verlauf der berühmte Satz *hypotheses non fingo* (»Hypothesen erdenke ich nicht«) vorkommt: Gerade weil Newton fest an einen allmächtigen Weltenlenker glaubte, suchte er keine Hypothese für das Wesen der Schwerkraft – wir beobachten die Geburt des Positivismus aus der Metaphysik.

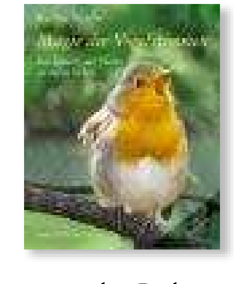
In der vergleichsweise knappen Auswahl aus Einsteins Schriften zum Relativitätsprinzip wird wohl kaum ein Leser all die Formeln nachrechnen wollen. Wieder sind selbst für Physiker vor allem die letzten Seiten interessant, in denen Einstein versucht, die Physik der Materie als Feldtheorie zu formulieren.

So kann man in dieser gewaltigen historischen Fundstätte immer wieder überraschende Entdeckungen machen – zum Beispiel, dass schon Kopernikus mit dem heute nach Galilei benannten Relativitätsprinzip argumentierte, um zu erklären, warum die Erde sich bewegt, ohne dass wir etwas davon merken. Für einen Nichthistoriker ist angesichts der Originalquellen immer wieder erstaunlich, wie verschlungen die Gedankenwege der wissenschaftlichen Vorläufer waren.

Alles in allem ein seltsames Konvolut: für Wissenschaftshistoriker zu unprofessionell, für Physiker zu umständlich, für allgemein Interessierte zu unübersichtlich. Trotzdem: Würde mir jemand das kleine Monster schenken, würde ich mich darin gleich festlesen – und öfters den Kopf schütteln.

Michael Springer

Der Rezensent ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.



ZOOLOGIE

Walther Streffer

Magie der Vogelstimmen

Die Sprache der Natur verstehen lernen

Freies Geistesleben, Stuttgart 2003. 240 Seiten, mit CD, € 39,–



männlicher Hänfling

Nirgendwo sonst in der Biologie arbeiten Wissenschaftler und engagierte Laien so eng zusammen wie in der Ornithologie. Neben dem Vogelzug vermag insbesondere der Vogelgesang zu faszinieren. Und so lauschte auch der Laie Walther Streffer über Jahrzehnte der »Schönheit und Vollkommenheit« des Vogelgesangs und wurde darüber zum Experten. Und da er nicht gänzlich der »Magie der Vogelstimmen« erlag, sondern auch das Studium der Fachliteratur pflegte, ist sein Werk ein durchweg gut formuliertes und didaktisch geschickt angelegtes Vogelbuch geworden.

Streffer porträtiert 89 Singvögel unserer heimischen Vogelwelt in Wort und ▷


Waldbaumläufer

▷ Bild und stellt sie in der beigelegten CD anhand von Stimmbeispielen vor. Im Mittelpunkt seiner Ausführungen steht der musikalische Aspekt, was er biologisch damit begründet, dass Vögel ein umso ausgeprägteres Territorialverhalten zeigen, je gesangsbegabter sie sind. Vor allem aber will er zeigen, dass sich im Vogelgesang über die biologischen Notwendigkeiten hinaus noch etwas »ankündigt« – nämlich »ein gewisser Grad von Autonomie«. Das erinnert an Konrad Lorenz, der Vogelgesang als »ein Kapitel aus dem Reich des Schönen innerhalb des artgemäß Zweckmäßigen« beschrieb.

Wer wie der Autor auf den »beseelten Ton« im Vogelgesang hört, bewegt sich wissenschaftlich auf dünnem Eis. Doch Streffer kann sich weit hinauswagen, ohne einzubrechen. Davor bewahrt ihn seine große Nähe zur lebenden Natur – jener Blick auf das »Ganze«, ohne den auch die methodisch auf Zerstückelung angewiesene Wissenschaft nicht auskommt.

Streffers Buch ist sowohl geeignet, Laien jene spezielleren Kenntnisse zu vermitteln, die den Genuss am Vogelgesang erheblich zu steigern vermögen, als auch Experten zu weiteren Nachforschungen anzuregen.

Reinhard Lassek

Der Rezensent ist promovierter Biologe und arbeitet als freier Journalist in Celle.

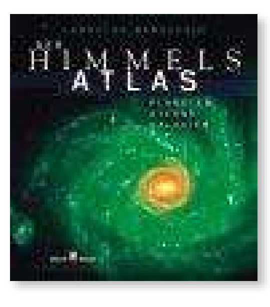
ASTRONOMIE

Leopoldo Benacchio

Der Himmelsatlas

Planeten, Sterne, Galaxien

Aus dem Italienischen von Anita Ehlers.
Frederking & Thaler, München 2003. 194 Seiten, € 50,–



Der unmittelbare Zugang zum Sternenhimmel geht uns immer mehr verloren. Wir sind nicht mehr auf den Lauf der Gestirne angewiesen, um die Zeit zu messen oder Ortsbestimmungen durchzuführen. Außerdem trübt uns die zunehmende Lichtverschmutzung den Blick ans Firmament.

Dieser Entfremdung will der Astronom Leopoldo Benacchio vom Observatorium von Padua mit seinem etwas anderen Himmelsatlas entgegenwirken. Die einzelnen Seiten des Buchs lassen sich zu großformatigen Bildtafeln auf- und ausklappen (Bild rechts).

Etwa 350 farbige Abbildungen stellen die Geheimnisse des Kosmos dar, wie wir sie mit bloßem Auge und vor allem mit »neuen Augen«, mit Teleskopen auf der Erde und im Weltraum, sehen. Die Themenvielfalt reicht von Sonne, Mond und Planetensystem über Sterne, Galaxien, Galaxienhaufen bis zur Kosmologie und macht auch vor außerirdischem Leben und den aktuellen, ungelösten Fragen der Astrophysik wie »dunkler Materie« oder »dunkler Energie« nicht Halt.

Ein großformatiges Foto und ein einleitender Text führen in das jeweilige Gebiet ein. Mehrere kleinere Bilder inklusive kurzer Begleittexte erläutern interessante Details. Ein Glossar astronomischer Namen und Ausdrücke ermöglicht auch dem Laien eine rasche Orientierung im Dschungel der Fachbegriffe. Eine Zusammenstellung häufig gestellter Fragen samt Antworten rundet das Buch ab. Da der Atlas die einzelnen Bereiche nur anreißen kann, findet sich am Ende ein Verzeichnis neuerer populärwissenschaftlicher Veröffentlichungen namhafter Autoren.

Leider gelingt es bei komplizierteren Sachverhalten nicht immer, das auf den Bildern Dargestellte im Rahmen der sehr kurzen Textpassagen allgemein verständlich zu beschreiben. Bei einigen wenigen Texten wird der Sinn – vielleicht durch Bearbeitung oder Kürzung – verdreht und geht manchmal sogar ganz verloren.

Dennoch ist der Himmelsatlas zum Auseinanderfalten besonders durch die vielen faszinierenden Bilder ein sehr schönes und geeignetes Buch für Laien und Kenner der Astronomie, das zum gemütlichen Schmökern einlädt.

Monika Maintz

Die Rezensentin ist promovierte Astronomin und freie Wissenschaftsjournalistin in Heidelberg.



▶ Der große Kegelnebel NGC2264 ist Entstehungsort vieler Sterne.

MEDIZIN

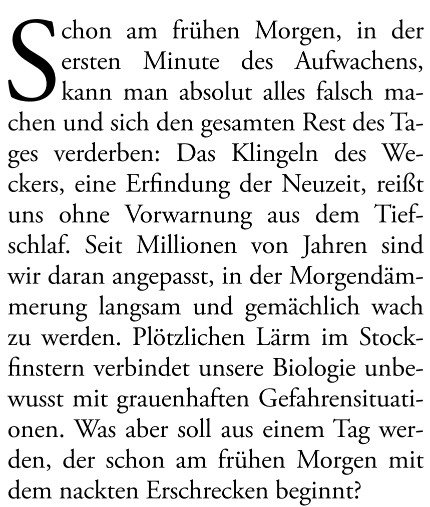
David Servan-Schreiber

Die neue Medizin der Emotionen

Stress, Angst, Depression: Gesund werden ohne Medikamente

Aus dem Französischen von Inge Leipold und Ursel Schäfer.
Antje Kunstmann, München 2004. 320 Seiten, € 22,–





Schon am frühen Morgen, in der ersten Minute des Aufwachens, kann man absolut alles falsch machen und sich den gesamten Rest des Tages verderben: Das Klingeln des Weckers, eine Erfindung der Neuzeit, reißt uns ohne Vorwarnung aus dem Tiefschlaf. Seit Millionen von Jahren sind wir daran angepasst, in der Morgendämmerung langsam und gemächlich wach zu werden. Plötzlichen Lärm im Stockfinstern verbindet unsere Biologie unbewusst mit grauenhaften Gefahrensituationen. Was aber soll aus einem Tag werden, der schon am frühen Morgen mit dem nackten Erschrecken beginnt?

Solche und viele ähnliche Sachverhalte schildert David Servan-Schreiber in seinem Buch und weist auch auf Möglichkeiten der Abhilfe hin. So gibt es gegen die abrupte Beendigung des REM-Schlafs längst Dämmerungslampen mit Zeitschaltuhren, die den Schläfer sanft und natürlich aufwachen lassen.

Don't panic! Wenn Arthur Dent, die Hauptfigur in Douglas Adams' Kultbuch »Per Anhalter durch die Galaxis«, gar nicht mehr weiter weiß, holt er sich Rat im »Hitchhiker's Guide«. Ein ähnlicher Allroundhelfer ist das vorliegende Buch. David Servan-Schreiber, ein Sohn des bekannten Publizisten Jean-Jacques Servan-Schreiber, ist zwar selbst Psychiater, bemüht sich in dem Buch aber nach Kräften, den Alleinherrschaftsanspruch der medikamentenbasierten Psychiatrie zu untergraben: Anhand alternativer Behandlungsverfahren und wissenschaftlicher Untersuchungen zeigt er, dass sich selbst hinter zunächst abstrus oder schamanistisch erscheinenden Behandlungsformen sinnvolle Verfahren verstecken können.

Der Lebenslauf des Verfassers ist bemerkenswert. Nach dem Medizinstudium in Paris und Québec betrieb er rund 20 Jahre lang an der Universität in Pittsburgh Grundlagenforschung in kognitiver Neurowissenschaft, die auch vor den gestrengen Gutachtern der höchst renommierten Zeitschrift »Science« Bestand hatte. Als Mitglied der amerikanischen Sektion des Verbands »Ärzte ohne Grenzen« unternahm er 1996 eine Reise nach Indien und besuchte unter anderem Dharamsala, den Exilsitz des Dalai Lama, wo er die traditionelle tibetanische Medizin kennen lernte. Wenig später beendete er überraschenderweise seine wissenschaftliche Karriere und wurde 1997 Chefpsychiater des Shadyside Hospital (der Klinik der Universität Pittsburgh). Rasch entwickelte er ein Unbehagen gegen die übliche medikamentöse Behandlung der hier untergebrachten Patienten und begann alternative Behandlungstechniken auf ihre Wirksamkeit hin zu prüfen. Schon im Jahr darauf wurde er zum Mitbegründer des »Center for Complementary Medicine«, einem Zentrum für die Untersuchung von komplementären Heilmethoden. Im Jahre 1999 reiste er ins Kosovo; ein Teil seiner Fallbeispiele stellt Menschen vor, die durch die Kriegsereignisse dort traumatisiert wurden.

Anheimelnde Seelenklempner-Lektüre, in der die Wichtigkeit der Emotionen betont wird, gibt es massenhaft; aber im Gegensatz zum Standard-Psycho-Selbsthilfe-Buch gibt Servan-Schreiber für jeden einzelnen der vorgeschlagenen Behandlungsansätze eine Erklärung der Wirkung auf der Grundlage neuropsychiatrischer Erkenntnisse. Dabei fasst er den aktuellen Stand des Wissens für Fachleute informativ und für den betroffenen Patienten gut verständlich zusammen. Die meisten unter den fast 300 zitierten Literaturquellen stammen aus hochrangigen Fachzeitschriften und sind höchstens sechs Jahre alt.

Das Buch spannt einen weiten Bogen, von grundlegenden Überlegungen über die »schwierige Hochzeit« zwischen unserem stammesgeschichtlich uralten Reptilienhirn und dem neuzeitlich-zivilisierten Neocortex bis hin zu ausführlichen Erklärungen, warum unser bewusstes Denken unsere Gefühle im Grunde kaum kontrollieren, sondern allenfalls trickreich beeinflussen kann. Im weiteren Verlauf werden dann unterschiedliche Behandlungstechniken vorgestellt, darunter die »Kohärenz«, eine Abwandlung des Autogenen Trainings, die den Herzschlag zu beruhigen und damit die eigenen Ängste zu reduzieren hilft. Eine andere, mir persönlich bis dahin weitgehend unbekannte Technik, das EMDR *(Eye movement desensitization and reprocessing)*, erlaubt es ähnlich wie der Traum, sich an zurückliegende belastende Ereignisse zu erinnern und diese zu verarbeiten. Servan-Schreiber überprüft sowohl fernöstliche Ansätze wie Qi oder Akupunktur auf ihre Nützlichkeit als auch die Auswirkungen von Sport und gesunder Ernährung auf den seelischen Zustand. Breiten Raum gibt er der antidepressiven Wirkung von sozialen Beziehungen, Liebe und Zärtlichkeit.

Was gibt es zu kritisieren? Der Titel klingt mehr nach einem missglückten Liebesroman und trifft nicht den wissenschaftlichen Anspruch; fast hätte er mich davon abgehalten, den Text überhaupt zu lesen. Ein populärwissenschaftliches Werk hätte man auch mit mehr als den mageren zehn Abbildungen schmackhaft machen sollen.

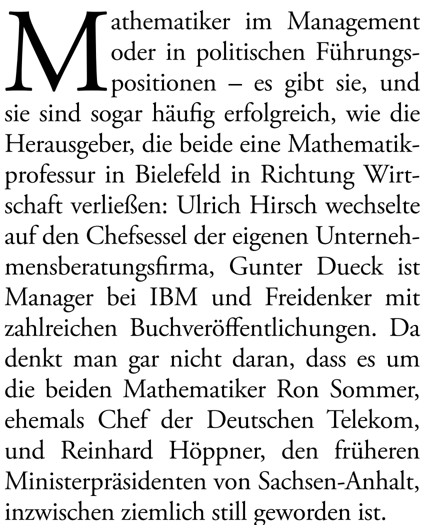
Auch schamanistische Behandlungsformen können sinnvoll sein

Hilfreich wäre besonders für den Laien auch eine Aufteilung der unterschiedlichen Arten von Ängsten und Depressionen gewesen, die hier etwas vermengt dargestellt werden. So hilft die im Buch unter anderem vorgestellte Lichttherapie im Wesentlichen nur gegen die SAD *(seasonal affective disorders)*, wohl kaum aber gegen eine schwere Depression mit psychotischen Anteilen. Leider sucht man auch ein Stichwortverzeichnis vergebens; immerhin gibt es eine Liste mit hilfreichen Adressen.

Was mir an dem Band besonders gut gefällt, ist die riesige Anzahl von Fallbeispielen. Servan-Schreiber nennt keine Behandlungsmethode, ohne eine mehr oder weniger authentisch klingende Patientengeschichte darzustellen. Das lockert die forscherische Detailarbeit immer wieder auf, sodass man das Buch auch als Freizeitlektüre lesen kann, ohne in dem langweiligen Staub wissenschaftlicher Metaanalysen über die Effektivitätsprüfungen der Ansätze zu versinken.

Erich Kasten

Der Rezensent ist promovierter Psychologe und approbierter Psychotherapeut; er entwickelt am Universitätsklinikum in Magdeburg neue Behandlungsverfahren für Patienten mit Hirnschäden.



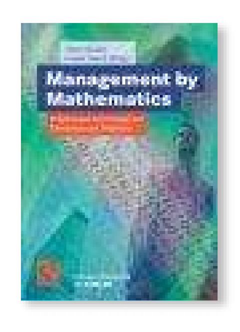
MANAGEMENT

Ulrich Hirsch und Gunter Dueck (Hg.)

Management by Mathematics

Erfahrungen und Erfolge von Executives und Politikern

Vieweg, Wiesbaden 2003. 218 Seiten, € 34,90



Mathematiker im Management oder in politischen Führungspositionen – es gibt sie, und sie sind sogar häufig erfolgreich, wie die Herausgeber, die beide eine Mathematikprofessur in Bielefeld in Richtung Wirtschaft verließen: Ulrich Hirsch wechselte auf den Chefsessel der eigenen Unternehmensberatungsfirma, Gunter Dueck ist Manager bei IBM und Freidenker mit zahlreichen Buchveröffentlichungen. Da denkt man gar nicht daran, dass es um die beiden Mathematiker Ron Sommer, ehemals Chef der Deutschen Telekom, und Reinhard Höppner, den früheren Ministerpräsidenten von Sachsen-Anhalt, inzwischen ziemlich still geworden ist.

In dem vorliegenden Buch versuchen 25 Mathematikerinnen und Mathematiker in wirtschaftlichen oder politischen Führungspositionen auf die Frage »Wie verträgt sich mathematisches Denken mit den Anforderungen dieser Position?« Auskunft zu geben.

Die erste Antwort ist: »Schlecht.« Rainer Janßen, der nach langen Jahren bei IBM den Zentralbereich Informatik der Münchener Rückversicherung leitet, weiß von vielen Einstellungsgesprächen zu berichten, in denen die mathematisch vorgebildeten Kandidaten die krassesten Vorurteile über den weltabgewandten, kommunikations- und kompromissunfähigen abstrakten Wahrheitssucher bestätigen. Demnach wären die Autoren dieses Buchs die Ausnahmen von der Regel, die Minderheit derjenigen, die trotz eines Mathematikstudiums noch über ausreichende Führungs- und Kommunikationsfähigkeiten verfügen?

So wollen sie sich selbst nicht verstanden wissen. Die Beiträge lassen in der Tat von der universitätsüblichen Denkweise kaum etwas erkennen; stattdessen gibt es sinnentleertes Innovations- und Effizienzgeschwätz im Übermaß. Etlichen Autoren ist anzumerken, dass ihnen zum Thema nicht viel eingefallen ist; ersatzweise preisen sie ihre jüngsten Management-Leistungen oder auch ihre Prinzipienfestigkeit, wie Bärbel Höhn, die nordrhein-westfälische Umweltministerin und prominente Vertreterin der Grünen, die Mathematik studiert und zwölf Jahre im Rechenzentrum der Universität Duisburg gearbeitet hat.

Bei aller Heterogenität der Beiträge sind sich die Autoren über eines einig: Das strukturierte Denken, das man als Mathematiker erlernt, ist hilfreich für die Verarbeitung der komplexen und vielschichtigen Zusammenhänge, die zum Alltag des Managers gehört. Dagegen ist von den Inhalten des Studiums selbst nichts oder fast nichts zu gebrauchen. Eine entscheidende Fähigkeit muss der Mathematikabsolvent erst noch lernen. Christoph Klingenberg, hochrangiger Manager bei der Lufthansa, bringt es auf den Punkt: »das Erkennen von Machtstrukturen und die Reaktion darauf, das Durchsetzungsvermögen«.

Gibt es denn gar keine Gelegenheit, mathematisches Denken so richtig in der Politik anzuwenden? Als Reinhard Höppner sein Ministerpräsidentenamt antrat, wurden die Probleme, die auf ihn warteten, mit der Quadratur des Kreises verglichen, die bekanntlich unmöglich ist. »Aber als Mathematiker weiß ich, dass es dafür sehr gute Näherungslösungen gibt«, sagte Höppner damals. In seinem Beitrag für das Buch zitiert er ein Problem aus einer Mathematik-Olympiade, an der er als Schüler teilgenommen hatte: König Artus will $2n$ Ritter zu seiner Tafelrunde einladen. Jeder von ihnen hat höchstens $n-1$ Feinde. Kann König Artus die Ritter so an der Tafel platzieren, dass nirgendwo zwei Feinde direkt nebeneinander sitzen? Die Antwort ist ja, aber die Lösung wird in dem Buch nicht verraten.

Als Höppner abgewählt wurde, hieß es, er habe sich nicht durch grobe Fehler unbeliebt gemacht. Vielmehr habe er den Leuten über den Zustand des Bundeslandes stets die – wenig erfreuliche – Wahrheit gesagt, und das hätten die nicht mehr hören wollen. Anscheinend hat Höppner doch eine entscheidende Führungsqualifikation gefehlt.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Die 5x5-Rezension des Monats von wissenschaft-online



Reto U. Schneider

Das Buch der verrückten Experimente

Bertelsmann, München 2004, 304 Seiten, € 19,90

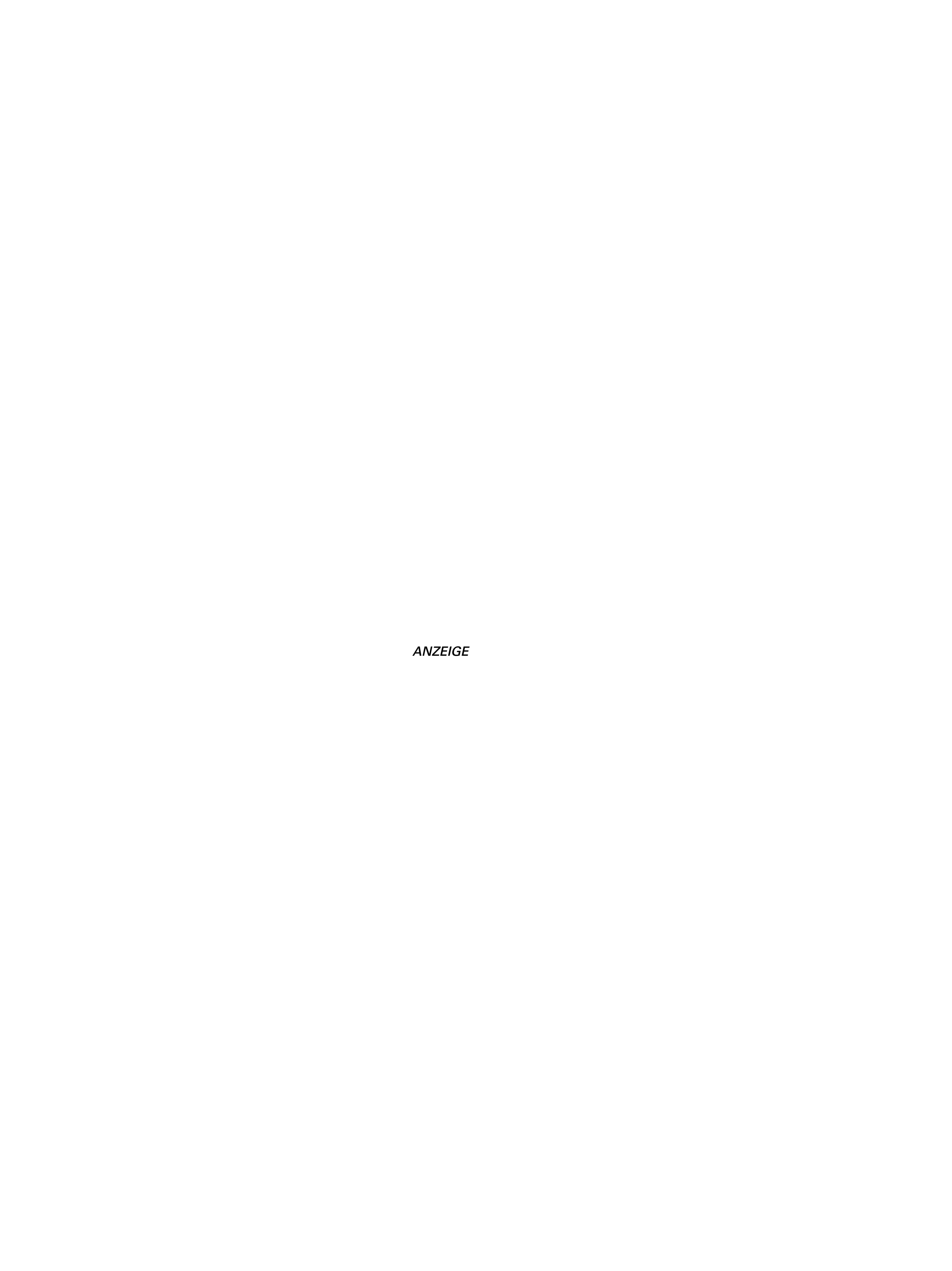
Der Wissenschaftsjournalist Reto U. Schneider stellt über hundert ungewöhnliche psychologische, biologische, medizinische und physikalische Experimente vor.

Manche davon sind überaus skurril oder grausam und bestätigen sämtliche *mad scientist*-Klischees. Andere sind völlig zu Recht in die Wissenschaftsgeschichte eingegangen. Wieder andere sind ebenso harmlos wie nutzlos. Und dann gibt es noch welche, an deren Originalität nicht zu zweifeln ist, die aber einen kleinen Nachteil haben. Sie werfen entweder jede Menge Fragen auf, liefern aber keine eindeutigen Antworten; oder sie liefern zwar Antworten, doch es ist ein Mysterium, auf welche Fragen.

Aus der Rezension von Frank Ufen

5x5 Rubriken	Punkte 1 • 2 • 3 • 4 • 5
Inhalt	■■■■■
Vermittlung	■■■■■
Verständlichkeit	■■■■■
Lesespaß	■■■■■
Preis/Leistung	■■■■
Gesamtpunktzahl	24

Den kompletten Text und zahlreiche weitere Rezensionen von wissenschaft-online finden Sie im Internet unter **http://www.wissenschaft-online.de/5x5**





CHEMIE

Ralf A. Jakobi und Henning Hopf

Humoristische Chemie

Wiley-VCH, Weinheim 2003. 286 Seiten, € 24,90

Hätten Sie gedacht, dass sich Isotope durch ihren pH-Wert unterscheiden? Oder dass thermoplastische Badezimmermatten Zimmertemperatur annehmen und man deshalb keine kalten Füße bekommt? Keine Bange, es stimmt nicht, aber es wurde von Chemiestudenten in der Prüfung geäußert, ebenso wie unzählige weitere Stilblüten, die die Chemieprofessoren Hopf und Jakobi für ihr Buch gesammelt haben.

Wer sich über die Wissenschaft und vor allem die Wissenschaftlerkollegen lustig macht, muss den Zorn eben dieser Kollegen fürchten. Da ist es besser, man ist Nobelpreisträger wie die *enfants terribles* des akademischen Establishments, Kary Mullis und Richard Feynman, oder wenigstens beamteter Professor und dem Ruhestand nahe wie Henning Hopf.

»Humoristische Chemie« ist ein buntes Sammelsurium von Kuriositäten, Stilblüten und Satiren, die sich direkt oder indirekt um die Chemie, oft genug auch um das akademische Leben in deutschen und anderen Landen drehen. Dem Insider bleibt an der ein oder anderen Stelle das Lachen im Halse stecken: Zu nah sind die satirischen Texte an der bitteren Realität, zum Beispiel Kapitel 5 mit dem Titel »Hier wird die Niete zur Elite – Karriere durch planvollen Bluff« mit den »nützlichen Ratschlägen« für Postdocs, aber auch für Manager der Branche.

Kapitel 4 zum Thema »Publish or perish – Resultate, die keiner braucht« behandelt das Damoklesschwert, das am seidenen Faden über unglücklichen Jungwissenschaftlern schwebt, die noch keine der seltenen Dauerstellen ergattern konnten. Wer heute in der akademischen Mühle steckt, wird verblüfft sein über die Aktualität der »Doktorandengespräche: gestern, heute, morgen« aus dem Jahre 1970!

Kapitel 13 »Neuerungen machen Eindruck – Hochschul- und Studienreform« ist schließlich so aktuell, dass es schon fast zum Lachen ist. Das »Bildnis einer Reform-Fakultät« ist von 1974, liest sich aber wie eine Posse der hysterischen Bildungskrisendiskussion des Jahres 2004. Dreißig Jahre heiße Luft, aber im Grunde hat sich nichts getan.

Ebenso brandaktuell wirkt schließlich der Essay »Ortografi – über die Hinrichtung des Zinnnitrates« – bis man am Ende des Aufsatzes erfährt, dass er aus dem Jahr 1987 ist! Die Rechtschreibreform hat den Unfug Wirklichkeit werden lassen.

Den beiden Herausgebern ist ein kurzweiliges, bisweilen köstliches Werk gelungen.

Thomas Lazar

Der Rezensent hat in Biochemie promoviert und ist freischaffender Sachbuchautor und Übersetzer in Göttingen.



ANTHROPOLOGIE

Carsten Niemitz

Das Geheimnis des aufrechten Gangs

Unsere Evolution verlief anders

C. H. Beck, München 2004. 256 Seiten, € 22,90

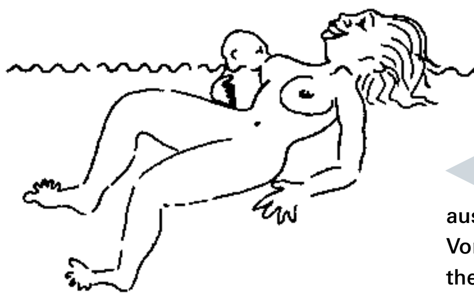
Warum unsere frühen Vorfahren damit angefangen haben, auf zwei Beinen zu gehen, ist nach wie vor nicht geklärt. Nach der Standardtheorie zwang sie ein Klimawandel, der ihren Lebensraum schrumpfen ließ, von den Bäumen herabzusteigen und ihr Glück in der Savanne zu versuchen. Doch der Berliner Anthropologe Carsten Niemitz glaubt nicht an diese Theorie. Nach seiner Auffassung kann sie etliche Fragen nicht schlüssig beantworten: Warum hat der Mensch als einziger Primat ein so ausgeprägtes Unterhautfettgewebe? Warum sind seine Hände im Unterschied zu denen aller anderen Menschenaffen derart altertümlich und unspezialisiert? Warum hat er stirnseitige Augen? Warum hat er so lange Beine und so große Füße? Und warum fühlt er sich nur wohl, wenn Wasser in seiner Nähe ist?

Nach Niemitz hat sich die Menschwerdung des Affen ganz anders vollzogen. Der Mensch stamme von amphibisch lebenden Hominiden ab, die im Wasser die Vorzüge des aufrechten Gangs entdeckten. Erst im Wasser stand ihnen regelmäßig rund ums Jahr reichlich eiweißreiche Nahrung zur Verfügung, die sie dringend für ihr ständig wachsendes, Energie fressendes Gehirn benötigten.

Das klingt vielleicht skurril. Aber watende, schwimmende und tauchende Affen, die sich von Muscheln, Schnecken, Krabben oder Fischen ernähren, gibt es jede Menge: Meerkatzen, Makaken, Languren, Paviane, Mandrills und Bonobos. Und: »Dass die Urzeit-Menschen ihren Eiweißbedarf durch Großwildjagd decken konnten, halte ich für ein Gerücht. Diese Jagden waren gefährlich, brachten nicht genug Ausbeute und hätten die Männer zu stark dezimiert. Der Beitrag der sammelnden und fischenden Frauen zum täglichen Nahrungspensum wird viel zu sehr unterschätzt. Wohl wegen des klischeehaften Bildes speerschleudernder und steinewerfender Männerhorden, das wir von der Steinzeit-Gesellschaft haben.«

Menschen sind nicht gerade geborene Schnellläufer, schon deswegen nicht, weil ihre übermäßig großen Füße sie daran hindern. Man hat errechnet, dass für einen 1,90 Meter großen Sprinter die ideale Fußgröße die eines einjährigen Kindes wäre. Im Unterschied zu den flinken bodenlebenden Primaten haben Menschen außerdem den Nachteil, dass ihre Beinmuskulatur mit ziemlich kurzen Sehnen ausgerüstet ist. Doch wenn man mit großen Füßen nur langsam von der Stelle kommt, wozu sind sie dann gut? Für dreierlei, antwortet Niemitz: Zurücklegen großer Entfernungen, langes Stehen – und Waten in seichten Gewässern.

Ähnliches gilt für die ungewöhnlich langen Beine, die der Mensch von den Urhominiden geerbt hat. Sie sind nützlich, um im aufrechten zweifüßigen Gang Marathonstrecken zu laufen und um in seichtem Wasser Nahrung zu suchen: Je länger die Beine, desto tiefer kann man ins Wasser steigen, ohne dass einen der Wasserwiderstand am Gehen hindert, der Auftrieb den Schritt unsi-



Affenmutter und -kind seien für das Stillen im Meer biologisch »ideal ausgestattet« gewesen. Solche naiven Vorstellungen brachten die »Wasseraffentheorie« in Misskredit.

cher macht oder einem schlicht das Wasser bis zum Halse steht.

Und schließlich und für Niemitz entscheidend: Mit einer ersten, unbeholfenen Frühform des aufrechten Gangs hätten die Hominiden gegen die schnellen Raubtiere der Savanne wenig Chancen gehabt. Doch als watende Primaten konnten sie ganz allmählich den Auftrieb und die Viskosität des Mediums Wasser zunehmend für sich nutzen. So blieb ihnen genug Zeit, sich längere Beine und bessere Gelenke, Sehnen und Bänder zuzulegen. Niemitz hält es ohne Weiteres für möglich, dass die Urhominiden anfangs an Land vierfüßig, im Wasser aber zweifüßig gegangen sind.

Neugeborene Gorillas, Orang-Utans und Schimpansen wirken mit ihrem von Falten zerfurchten Gesicht wie vorzeitig vergreiste Zwerge, und ihr Körper ist spindeldürr. Demgegenüber kommen Menschen mit Fettpolstern am ganzen Körper auf die Welt, und auch die magersten Erwachsenen schleppen dauernd eine beträchtliche Menge Fett mit sich herum. Der Mensch ist der einzige Primat, dessen Unterhaut mit einer dicken Schicht aus Fettgewebe ausgestattet ist. Allerdings lagert sich bei Männern und Frauen weitaus das meiste Fett an den Hüften, am Bauch, an den Schenkeln und Waden ab, deutlich weniger hingegen an den oberen Körperpartien. Diese Verteilung des Fettgewebes lässt in Niemitz' Augen nur einen Schluss zu: Seine ursprüngliche Funktion bestand darin, den Wärmeverlust beim Waten in Grenzen zu halten.

Die Urhominiden, behauptet Niemitz, waren ökologische Generalisten, die mit den Verhältnissen am Boden ebenso gut zurechtkamen wie mit denen am und im Wasser. Die Angewohnheit, in den Bäumen zu klettern, dürften sie allerdings noch lange beibehalten haben – schon um sich bei Gefahr und zum Schlafen dorthin zurückziehen zu können. Dass sie Baumspezialisten waren, hält Niemitz allerdings für ausgeschlossen. Die Hände des Menschen haben die stärkste Ähnlichkeit mit denen der Berberaffen, Rotgesichtsmakaken und Rhesusaffen, die im Gegensatz zu den Orang-Utans, Gorillas und Schimpansen nicht auf das Leben auf Bäumen spezialisiert sind. Außerdem liegen die Augen des Menschen vergleichsweise eng beieinander auf der Stirnseite – wenig zweckmäßig für Baumbewohner, die für eine gute räumliche Wahrnehmung einen möglichst großen Augenabstand brauchen.

Unsere Vorfahren lernten also, das Wasser zu schätzen (und daraufhin, sich aufzurichten). Und deshalb, vermutet Niemitz, finden ihre menschlichen Nachfahren nichts unwiderstehlicher als ein Haus mit Swimmingpool oder eine Villa mit Blick aufs Meer. ▷

▷ Um Missverständnissen vorzubeugen: Mit der vor einigen Jahrzehnten von Allister Hardy begründeten und heute am vehementesten von Elaine Morgan verfochtenen »Wasseraffentheorie« will Niemitz nichts zu schaffen haben. Ihre Postulate hält er für ebenso abwegig wie ihre analogisierende Vorgehensweise. Mit der gleichen Berechtigung könnte man aus anatomischen Ähnlichkeiten zwischen Menschen und Fledermäusen ableiten, dass sich die frühesten Hominiden fliegend fortbewegt haben müssten.

Demgegenüber bietet Niemitz eine spekulative, aber gut durchdachte und von vielen Indizien gestützte Theorie. Da sie sich in erster Linie auf Befunde der vergleichenden Anatomie stützt, ist sie zumindest insofern auch falsifizierbar. Ob sie tragfähig ist, müssen weitere Forschungen erweisen.

Frank Ufen

Der Rezensent ist freier Wissenschaftsjournalist in Marne.

PALÄONTOLOGIE

Max Urlichs und Bernhard Ziegler

Farbatlas Fossilien

Eugen Ulmer, Stuttgart 2003. 288 Seiten, € 24,90

Die Fülle der Lebensformen, die sich in Fossilfunden präsentiert, ist unerschöpflich. Aus ihr haben die Wissenschaftler des Staatlichen Museums für Naturkunde in Stuttgart eine Auswahl getroffen und in 339 Fotos vorgestellt. So sind von insgesamt über 5000 Ammonitenarten immerhin sechzig vertreten. Allgemein haben die Autoren nicht nur für jede Epoche das charakterisierende »Leitfossil«, sondern auch für jede wichtige Gattung und Art mindestens einen Vertreter in ihre Sammlung aufgenommen. Pflanzliche Versteinerungen werden ebenso dargestellt wie Schwämme, Weich- und Hohltiere, Stachelhäuter und Insekten bis hin zu Wirbeltieren. Das abschließende erschöpfende Register erleichtert den Zugriff.

Die Stärke des hübschen Bändchens liegt in der gelungenen Kombination von Bild und Text. Für die Bilder wurde alles genutzt, was die heutigen technischen Möglichkeiten von Fotografie und Druck hergeben, und das Ergebnis ist wahrhaft augen(ge)fällig; schade nur, dass das Buchformat eine so geringe Bildgröße erzwingt. Die Texte sind knappe, verständliche Abhandlungen mit typisierenden Zeichnungen von Phänotyp und Anatomie, anatomischen Schnittbildern und anderen Grafiken.

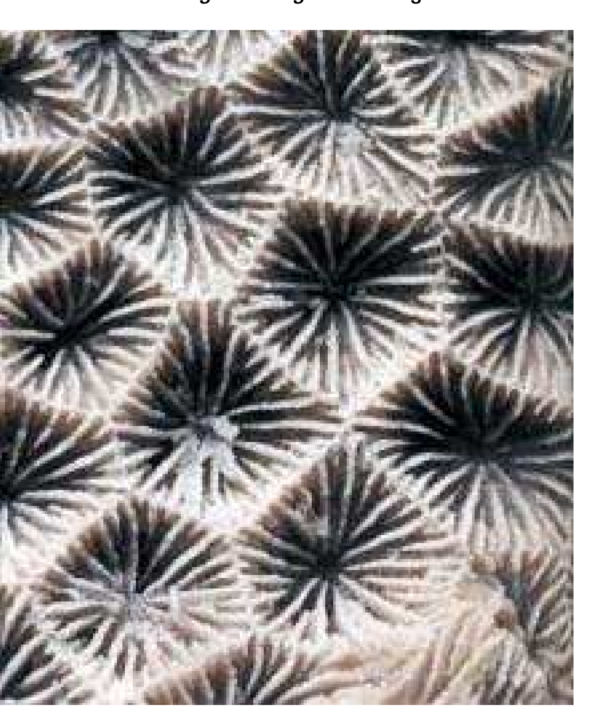
Jedes Kapitel beginnt mit einem Block aus allgemeinen Erläuterungen zu einer Gruppe von Organismen und beschreibt dann deren Formen, welche die Evolution in immer komplizierteren Mustern hervorgebracht hat und wieder hat untergehen lassen. So ergibt sich eine gewisse Systematik der Darstellung, die allerdings Platz lässt für gewaltige Sprünge – sogar auf ein und derselben Seite.

Der Titel »Atlas« passt nicht recht auf ein Büchlein, das aus Umfangsgründen einen Anspruch auf Vollständigkeit nicht erfüllen kann. Als Bestimmungsbuch für den Sammler kann und will es jedenfalls nicht dienen.

Man mag es als Bilderbuch genießen, sich an der ausgebreiteten Wissenschaft bereichern – und es vielleicht zum Anlass nehmen, erneut über das Wunder der Entstehung des Lebens vor mehr als drei Milliarden Jahren nachzudenken.

Arno Mehling

Der Rezensent ist Richter im Ruhestand in Bayreuth und seit Jahrzehnten passionierter Fossiliensammler. ◁

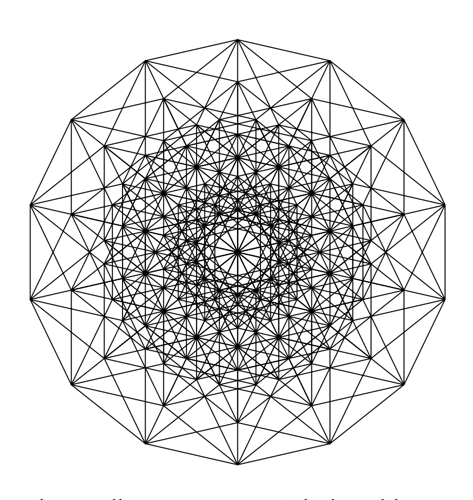




Kelche der Koralle *Isastrea* aus dem Oberjura (links). Kleine Muscheln der Art *Congeria spathulata* haben sich im Jungtertiär in der leeren Schale einer *Congeria subglobosa* eingenistet.

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

Strick-Muster und der Einheitswürfel im $\mathbb{R}^5$



Geschickt gedreht und beleuchtet, erhellt ein Gebilde aus dem fünfdimensionalen Raum die Geometrie ebener Pflasterungen.

Von Christoph Pöppe

Es fängt ganz hausbacken an: Man entdeckt vielleicht durch Zeichnen, dass man ein regelmäßiges Zehneck auf dekorative Weise mit Rauten (Rhomben) auslegen kann. Eine Raute hat vier gleich lange Seiten, und diese Seitenlänge ist für alle beteiligten Rauten die gleiche, nämlich die Seitenlänge des Zehnecks. Fünf schmale Rauten mit dem Öffnungswinkel 36 Grad säumen den Rand des Zehnecks und lassen einen etwas dicklichen Seestern in der Mitte frei, der genau von fünf dicken Rauten mit dem Öffnungswinkel 72 Grad gefüllt wird (Bild unten).

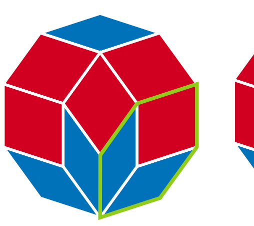
Ist das eine Spezialität des Zehnecks? Keineswegs. Man kann jedes regelmäßige Vieleck, das eine gerade Anzahl von Ecken hat, mit einem geeigneten Sortiment von Rauten füllen – wenn auch nicht immer in zentralsymmetrischer Weise. Beim Zwölfeck kommen drei verschiedene Sorten Rauten mit den Öffnungswinkeln 30, 60 und 90 Grad zum Einsatz; die 90-Grad-Raute ist besser unter dem Namen Quadrat bekannt.

Die schmalste Raute hat stets den Öffnungswinkel 360 Grad geteilt durch die Eckenzahl; alle weiteren Öffnungswinkel sind ganzzahlige Vielfache dieses Basiswinkels. Für das Vierzehneck beträgt demnach der kleinste Öffnungswinkel 360/14 = 180/7 Grad, was eine krumme Zahl ist; weitere Rauten haben den doppelten, dreifachen, vierfachen … Winkel. Aber die Raute mit dem vierfachen Winkel ist dieselbe wie die mit dem dreifachen; denn der spitze und der stumpfe Winkel einer Raute ergänzen sich zu 180 Grad, und wenn der spitze Winkel gleich (3/7)·180 Grad ist, muss der stumpfe gleich (4/7)·180 Grad sein.

Heinz Klaus Strick, Leiter des Landrat-Lucas-Gymnasiums in Leverkusen-Opladen und Mathematiker, hat im vorletzten Jahr bei einer großen Mathematikausstellung in seiner Schule zahlreiche Rauten in Größen, die auf Zehn-, Zwölf- oder Vierzehnecke angepasst waren, für das Publikum zum Spielen bereitgelegt. (Natürlich hilft es, wenn unter den ortsansässigen Unternehmen ein zum Sponsoring bereiter Kunststoffhersteller ist.) Und siehe da: In die Vielecke mit der Eckenzahl $2n$ passen die Rauten auf sehr viele verschiedene Weisen. So können sich zum Beispiel $n-1$ Rauten der schmalsten Größe wie die äußeren Blätter einer Artischocke um den tiefsten Punkt des Vielecks scharen; aus diesem Kelch wächst dann eine prachtvolle Blüte – farbenfroh, wenn die Rauten verschiedener Sorten von verschiedener Farbe sind (Bild oben, rechts).

ALLE ABBILDUNGEN: CHRISTOPH PÖPPE

Füllung des regelmäßigen Zehnecks mit dicken und dünnen Rauten in zentralsymmetrischer (links) und Artischockenanordnung. Das linke Bild zeigt zusätzlich die Kanten des fünfdimensionalen Würfels in einer Projektion auf die Ebene. Alle Rauten-Füllungen des Zehnecks müssen diesen schwarzen Linien folgen. Aus einer Füllung macht man eine neue, indem man ein Sechseck aus drei Rauten (grün umrandet) umdreht.

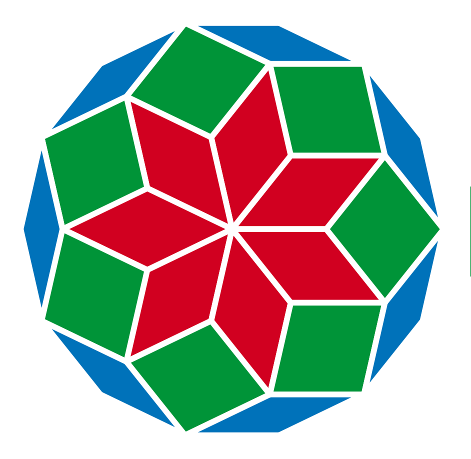




Kleiner Ausflug in die *n*-te Dimension

Weniger regelmäßige Muster gibt es in unüberschaubarer Anzahl; immerhin haben Stricks Schüler sie für das Zehneck im Rahmen einer Projektarbeit vollständig klassifiziert und die Beziehungen zwischen ihnen dokumentiert. Dabei finden sich immer wieder Sechsecke aus – zum Beispiel – zwei dünnen und einer dicken Raute, die man nur um 180 Grad drehen und wieder einsetzen muss, um aus einem Muster ein anderes zu machen (grün umrandetes Sechseck im Bild links).

Einen adlergleichen Überblick über diese Muster gewinnt man, indem man von den zwei Dimensionen der Tischplatte, auf der sich bisher alles abspielte, zu einer höheren Warte übergeht. Dabei muss man keine besonders große Entfernung zurücklegen, aber sich doch in Räume begeben, in denen man sich nicht unbedingt zu Hause fühlt: den fünfdimensionalen Raum ($\mathbb{R}^5$) für das Zehneck, den $\mathbb{R}^7$ für das Vierzehneck und allgemein den $\mathbb{R}^n$, den n-dimensionalen Raum, für das $(2n)$-Eck.





Der siebendimensionale Hyperwürfel (links die Projektion seiner Kanten) liefert das Schema für Füllungen des Vierzehnecks.

Ich gebe zu, es ist mühsam, sich in Räumen mit mehr als drei Dimensionen zurechtzufinden. In den letzten beiden Folgen habe ich Sie mit den Besonderheiten des Lebens im $\mathbb{R}^4$ vertraut zu machen versucht und einen scheuen Ausblick in den $\mathbb{R}^5$ gegeben. Aber wenn man sich erst einmal daran gewöhnt hat, dass die uns geläufige Anschauung sich auf die Krücken des abstrakten Formalismus stützen muss, fällt das Laufen nicht mehr so schwer.

Ab der fünften Dimension ist es auch vorbei mit der Vielfalt der platonischen Körper, auf die meine Freundinnen aus der vierten Dimension so stolz waren. In jeder Dimension gibt es deren nur noch drei, und in unserem Zusammenhang interessiert uns von ihnen nur einer: der so genannte Hyperwürfel. Es handelt sich um die Verallgemeinerung unseres vertrauten Würfels, und die Krücken, auf denen man sich ihm nähert, heißen Koordinaten.

Unser gewöhnlicher $\mathbb{R}^3$ ist mit einem Koordinatensystem ausgestattet. Das heißt, von einem Nullpunkt aus gehen die drei Koordinatenachsen (x-, y- und z-Achse) in zueinander senkrechten Richtungen ab. Um uns unnötige Schwierigkeiten zu ersparen, setzen wir den gewöhnlichen Würfel so bequem wie möglich in den $\mathbb{R}^3$, und zwar mit einer Ecke in den Nullpunkt; die drei von dieser Ecke ausgehenden Kanten verlaufen entlang der Koordinatenachsen und haben die Länge 1. Dann nämlich sind die Koordinaten sämtlicher Würfelecken sehr einfach: (0, 0, 0), (0, 0, 1), … und so weiter, sodass jede beliebige Kombination von Nullen und Einsen vorkommt.

Mit dem Hyperwürfel verfahren wir genauso. Eine Ecke sitzt im Nullpunkt des n-dimensionalen Koordinatensystems. Von ihr gehen n Kanten der Länge 1 aus, die entlang den n Koordinatenachsen verlaufen und sämtlich aufeinander senkrecht stehen.

Ja – das ist die Stelle, an der die Anschauung aussetzt. Aber vertrauen Sie den algebraischen Krücken! Wir können uns die Ecken zwar nicht mehr vorstellen, aber ihre Koordinaten mühelos hinschreiben: Es sind wie zuvor sämtliche Kombinationen von Nullen und Einsen. Nur braucht ein Punkt – zum Beispiel – im $\mathbb{R}^5$ zu seiner Beschreibung fünf Koordinaten. Da darf man sich nicht wundern, wenn der fünfdimensionale Hyperwürfel stolze 32 ($=2^5$) Ecken hat.

Nicht nur das: Er wird seinerseits von zehn Viererwürfeln begrenzt. Dabei muss man sich klar machen, dass für einen Fünfdimensionalen etwas Vierdimensionales schon sehr dünn ist, so wie wir die ebenen Begrenzungsflächen eines (Dreier-)Würfels für dünn halten. Die gemeinsame Grenze zweier Viererwürfel ist ein – noch dünnerer – Dreierwürfel, und so weiter. Dick oder dünn ist da eine Frage der eigenen Dimensionalität.

Der Schatten des $\mathbb{R}^5$-Würfels …

Damit nun dieses umfängliche Gebilde zu Stricks Rautenmustern etwas beitragen kann, beleuchten wir es mit diffusem, parallelem Licht so, dass es einen Schatten auf die Tischebene wirft. Dabei fällt das Licht parallel zur Verbindungsgeraden der beiden gegenüberliegenden Ecken (0, 0, …, 0) und (1, 1, …, 1) ein, und die Tischebene liegt senkrecht zum Lichteinfall.

Beim gewöhnlichen (Dreier-)Würfel wäre damit bereits festgelegt, was geschieht. Der Würfel steht auf einer Ecke, seine gegenüberliegende Ecke schwebt genau darüber, und das Ganze wird von oben beleuchtet. Dabei ergibt sich als Schatten ein Sechseck, in dem sowohl die drei oberen Flächen als auch die drei unteren als Rauten erscheinen (siehe die »Mathematischen Unterhaltungen« im Dezemberheft 2004, S. 106).

Was eine Beleuchtung mit parallelem Licht im $\mathbb{R}^5$ sein soll, ist weitaus weniger klar. Ganz abgesehen von den praktischen Schwierigkeiten, eine Glühbirne in einen höherdimensionalen Raum zu bringen und dort mit Strom zu versorgen: Es gibt sehr viel mehr Richtungen, die alle für sich beanspruchen können, parallel zu einer bestimmten Geraden zu sein. Glücklicherweise müssen wir uns um solche Probleme überhaupt nicht kümmern. Die algebraischen Krücken tun hier gute Dienste.

Zweckmäßig nennt man den Punkt, auf den der Schatten des Nullpunkts fällt, auch den Nullpunkt der Tischebene. Es genügt dann anzusagen, auf welche Punkte der Ebene die Schatten der Eckpunkte fallen, die mit dem Nullpunkt durch genau eine Kante verbunden sind; diese Punkte sind genau das, was man die Koordinaten-Einheitsvektoren nennt.

Wenn man weiß, auf welche Punkte diese Einheitsvektoren abgebildet werden – das heißt auf welche Punkte ihr Schatten fällt –, kann man nämlich das Bild jedes beliebigen Punkts ausrechnen. Denn unsere Schatten-Abbildung ist eine so genannte lineare Abbildung. Formal wird das durch die Gleichungen $f(x+y)=f(x)+f(y)$ und $f(ax)=af(x)$ ausgedrückt. Anschaulich heißt das: Wenn vier Vektoren »oben« im $\mathbb{R}^5$ ein Parallelogramm bilden, dann tun ihre Schatten »unten« im $\mathbb{R}^2$ das auch.

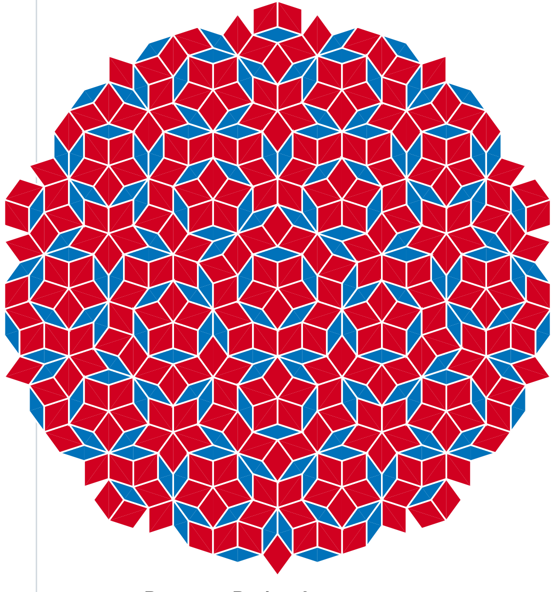
Will man nun das Bild eines beliebigen Punkts bestimmen, dann zerlegt man den Vektor, der vom Nullpunkt zu diesem Punkt geht, in eine Summe von Vektoren, die in Richtung der Einheitsvektoren verlaufen, und nutzt die Gleichungen für die Linearität. Anschaulich gesprochen: Wir legen vom Nullpunkt zu unserem abzubildenden Punkt eine Kette von Parallelogrammen, von der jedes Glied in Richtung eines Einheitsvektors weist. Die entsprechende Parallelogrammkette auf der Tischfläche führt uns zu unserem gesuchten Bildpunkt. ▷

▷ Und wohin sollen nun die fünf Einheitsvektoren abgebildet werden? Wenn es hinterher gut aussehen soll, ist »so symmetrisch wie möglich« immer ein gutes Rezept. Das heißt in diesem Fall: Man bilde die Einheitsvektoren auf die Ecken eines regelmäßigen Fünfecks ab, dessen Mittelpunkt der Nullpunkt ist. Aus den Würfelkanten, die vom Nullpunkt des $\mathbb{R}^5$ ausgehen, werden also die Vektoren, die vom Nullpunkt der Tischebene aus auf die Ecken des Fünfecks weisen. Wie die Einheitsvektoren selbst sind deren Bilder unter unserer Projektion untereinander alle gleich lang.

Damit sind nun alle Zutaten für die »Strick-Muster« beisammen. Denn der Fünferwürfel enthält zahlreiche Quadrate; die begrenzen nämlich die Dreierwürfel, welche die Viererwürfel begrenzen, welche den Fünferwürfel begrenzen. Quadrate sind insbesondere Parallelogramme. Also findet man als Schatten der Quadrate lauter Parallelogramme wieder. Es sind sogar Rauten, denn die Bilder aller Einheitsvektoren sind gleich lang. Der Öffnungswinkel der Rauten beträgt 72 Grad oder ein Vielfaches davon, denn das sind die Winkel der Fünfecksvektoren untereinander. Da 144 Grad der stumpfe Winkel der Raute mit dem spitzen Winkel 36 Grad ist und alle weiteren Vielfachen von 72 Grad nichts Neues bringen, kommen in dem Schatten des Fünferwürfels genau die dicke und die dünne Raute vor, die ich eingangs beschrieben habe.

Mehr noch: Stellen wir uns jetzt vor, der Fünferwürfel wäre nicht ein Kantenmodell aus Draht, sondern massiv, und es wären deswegen in der Projektion nur die Teile sichtbar, die unserer Bildebene am nächsten liegen und nicht durch andere Teile verdeckt werden. Dafür ist die Idee vom Schatten nicht mehr erhellend; vielmehr müssen wir uns vorstellen, nicht die Richtung des Lichts, sondern unsere Blickrichtung verlaufe in der beschriebenen, speziellen Weise in den $\mathbb{R}^5$, und wir könnten dort den Fünferwürfel selbst betrachten – natürlich in perspektivischer Verzerrung, denn von den zahlreichen Quadraten, die in ihm enthalten sind, ist keines genau uns zugewandt.

Offensichtlich sehen wir bei diesem Blick in den $\mathbb{R}^5$ lauter Quadrate, die aneinander grenzen, aber nie solche, die sich überlappen oder Lücken zwischen sich lassen. Dasselbe gilt für deren Bilder, die Rauten, in der Ebene.



Penrose-Parkettierung

… ist ein Zehneck

Der äußere Umriss des Bilds vom Fünferwürfel muss ein regelmäßiges Zehneck sein. Warum? Das Original ist konvex, das heißt: Auf der geraden Verbindungslinie zwischen zwei Punkten des Fünferwürfels liegt kein Punkt, der nicht auch zum Fünferwürfel gehörte. Da durch die Projektion die gerade Verbindungslinie zweier Punkte auf die gerade Verbindungslinie ihrer Bildpunkte abgebildet wird, muss auch das Bild insgesamt konvex sein. Aus demselben Grund muss der Rand des Gesamtbilds aus Bildern von Kanten bestehen.

Der Original-Fünferwürfel hat eine fünfzählige Symmetrie bezüglich zyklischer Vertauschung der Einheitsvektoren (ersetze den ersten durch den zweiten, den zweiten durch den dritten, … den letzten durch den ersten); also muss auch sein Bild wegen der speziellen Wahl der Bilder der Einheitsvektoren fünfzählig symmetrisch sein. Alle Kanten des Fünferwürfels sind zu einer der Einheitsvektor-Kanten parallel, also müssen die Kanten des Bilds sämtlich parallel zu einer der fünf Einheitsrichtungen sein. Schließlich lässt sich – mit etwas mehr Mühe – zeigen, dass Bild und Urbild auch um 180 Grad drehsymmetrisch sein müssen; und dann bleibt nur noch das Zehneck.

Man kann den Fünferwürfel auch partiell demontieren. Nimmt man ihm einen der zahlreichen ihn begrenzenden Dreierwürfel weg, so entsteht noch kein richtiges Loch; so ein Dreierwürfel ist ja sehr dünn vom fünfdimensionalen Standpunkt aus. Aber wir sehen statt seiner drei »außen gelegenen« Flächen jetzt die »innen gelegenen«. Dadurch wird das Sechseck, das die Außenkontur vom Bild des Würfels lieferte, nicht mehr auf die eine, sondern auf die andere Weise in Rauten zerlegt. Auch beim geringfügig demontierten Fünferwürfel ist das Bild also eine der Füllungen des Zehnecks mit Rauten, die Heinz Klaus Strick mit seinen Schülern erarbeitet hat. Das Wegnehmen eines Würfels entspricht genau dem Umdrehen eines Sechsecks.

Projiziert man das Kantenmodell des Fünferwürfels in die Ebene (Bild S. 106, links), so findet man alle Linien, entlang denen eine Füllung des Zehnecks mit Rauten verlaufen kann. Auch das Artischockenmuster ist darunter; es geht nicht anders. Denn jeder Eckpunkt des Zehnecks ist das Bild eines Fünferwürfel-Eckpunkts. Von ihm gehen, wie von jedem anderen Eckpunkt des Fünferwürfels, fünf Kanten aus, deren Bilder wir im Zehneck wiederfinden müssen. Da sie aber alle im Inneren des Zehnecks liegen müssen, bleibt ihnen gar nichts anderes übrig, als im spitzestmöglichen Winkel zueinander zu liegen. Das ergibt die äußersten Blätter der Artischocke.

Was ich bisher am Beispiel des $\mathbb{R}^5$ und des Zehnecks erläutert habe, gilt in genau derselben Weise für andere Dimensionen. So beweist man durch einen Ausflug in den $\mathbb{R}^7$, dass es zentralsymmetrische, artischockenartige und zahlreiche andere Rautenfüllungen des regelmäßigen Vierzehnecks geben muss. Indem man für die konkrete Zahl 5 oder 7 die allgemeine Variable n einsetzt, erledigt man die ganze Denkarbeit für alle Dimensionen auf einen Streich.

Für geradzahlige n, das heißt, die Eckenzahl $2n$ des Vielecks ist durch 4 teilbar, gibt es eine weitere Klasse von Mustern, darunter auch zentralsymmetrische. Bei ihnen ist die Seitenlänge der Raute gleich der halben Seitenlänge des Vielecks.

Zugegeben: Man kann diese und weitere Eigenschaften der Strick-Muster auch finden – wenn auch weit weniger elegant –, indem man beim Argumentieren »auf dem Teppich«, sprich in der zweidimensionalen Ebene, bleibt. Lohnt es denn wirklich, dafür die Reise in höherdimensionale Welten zu unternehmen, die doch beim ersten Mal ziemlich beschwerlich ist?

Ich würde sagen: Schon aus touristischen Gründen sollte man sich einen Besuch in einem höheren $\mathbb{R}^n$ nicht entgehen lassen. Es gibt dort einfach unglaubliche Dinge, die einem zu Hause im $\mathbb{R}^3$ nicht im Traum in den Sinn gekommen wären. Für die professionellen Mathematiker gehört das Arbeiten mit abstrakten Vektoren, die mehr als drei Komponenten haben, ohnehin zum Alltagsgeschäft.

Von *n*-Eck-Puzzles zu Penrose-Parkettierungen

Manchmal verschafft einem der Ausflug in die höheren Dimensionen sogar Einsichten über Zweidimensionales, die man dortselbst beim besten Willen nicht gewinnen kann. Man nehme nicht nur einen Fünferwürfel, sondern deren beliebig viele. Wie ihre mickrigen Kollegen aus dem $\mathbb{R}^3$ lassen sie sich raumfüllend und lückenlos zu beliebig ausgedehnten Türmen stapeln. Im $\mathbb{R}^5$ ist, wie nicht anders zu erwarten, der Verbrauch an Bauklötzen höher, denn jeder Würfel hat wesentlich mehr als sechs Nachbarn, die mit ihm zumindest eine Fläche gemeinsam haben.

Das Projektionsbild eines solchen Würfelstapels besteht aus Zehnecken, die sich teilweise überlappen; denn in der von uns gewählten schrägen Perspektive sind die Würfel nicht säuberlich getrennt. Es kommen aber nach wie vor nur die gewohnten dicken und dünnen Rauten vor. Wir gewinnen also eine Pflasterung, das heißt eine lückenlose, überlappungsfreie Überdeckung der Ebene mit dicken und dünnen Rauten. Je nachdem, wie wir unseren Stapel im $\mathbb{R}^5$ bauen, hat diese Pflasterung sehr interessante Eigenschaften. So lassen sich insbesondere die berühmten Penrose-Parkettierungen mitsamt ihren Quasikristall-Eigenschaften aus einer geschickt gewählten Würfelstapelung im $\mathbb{R}^5$ herleiten (Bild links; siehe auch Spektrum der Wissenschaft 2/2002, S. 64). ◁



Christoph Pöppe ist promovierter Mathematiker und Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

Von Penrose-Parkettierungen zu *n*-Eck-Puzzles. Von Heinz Klaus Strick in: Praxis der Mathematik, Bd. 44, Nr. 3, S. 105, 2002

Weblinks zu diesem Thema finden Sie bei www.spektrum.de unter »Inhaltsverzeichnis«.

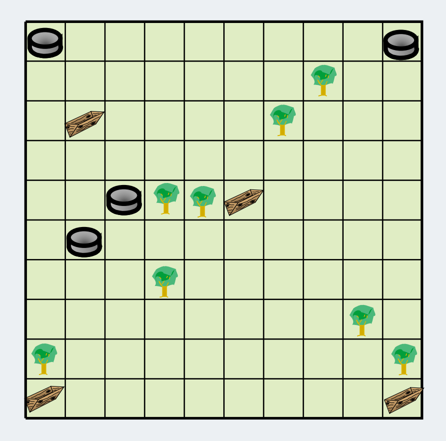
PREISRÄTSEL

Jans zerstrittene Herde

Von Roland Mildner

Bauer Jan möchte seinen vier zerstrittenen Milchkühen vier getrennte, aber in sich zusammenhängende und zueinander kongruente Weideflächen abstecken. Dabei möchte er die Zäune ausschließlich auf den vorgegebenen Linien ziehen. Auf jeder Weide sollen ein Brunnen, zwei Bäume zum Reiben und ein Trog mit Kraftfutter stehen.

Wie kann Jan die Weide für seine zerstrittene Herde einteilen?



Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir einen Globus »Globus 4 Kids«. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 15. Februar 2005, eingehen.

Lösung zu »Kindergeburtstag« (Dezember 2004)

Die zehn möglichen Kombinationen der Kuchenstücke sind in der Tabelle unten eingetragen.

A	1	4	8	3	12	7	2	11	6	1
B	1	3	2	6	1	5	9	4	8	12
C	12	8	6	6	4	4	4	2	2	2

Heinrich Biener aus Weilheim zeigte, wie sich dieses Problem auch »zu Fuß«, das heißt ohne Einsatz eines Computerprogramms lösen lässt:

a, b und c sind die Stückzahlen der Kuchensorten A (zum Preis von 0,80 Euro), B (1,– Euro) und C (1,10 Euro). Aus der Bedingung, dass die Gesamtsumme genau 15 Euro betragen muss, ergibt sich die Gleichung

$$0{,}8a + 1b + 1{,}1c = 15,$$

die durch Multiplikation mit 10 in die folgende diophantische Gleichung (nicht nur die Konstanten, auch die Lösungen müssen ganze Zahlen sein) übergeht:

$$8a + 10b + 11c = 150$$

Man ziehe auf beiden Seiten der Gleichung $11c$ ab und dividiere durch 2:

$$4a + 5b = (150 - 11c)/2$$

Aus dieser Gleichung lassen sich zwei Dinge schließen:

- Da a und b mindestens 1 sind, ist

$$9 \leq (150 - 11c)/2 \text{ und damit } c \leq 12.$$

- Da $4a + 5b$ eine natürliche Zahl ist, muss $150 - 11c$ gerade sein und folglich auch c.

Für c kommen deshalb nur 2, 4, 6, 8, 10 und 12 in Frage. Für jeden dieser Werte gewinnt man aus der obigen Gleichung die möglichen Werte für a und b.

Beispiel: Für $c = 2$ folgt $4a + 5b = 9$ und daraus sofort $a = 1$ sowie $b = 1$.

Die anderen Lösungen findet man analog hierzu rasch durch Ausprobieren.

Die Gewinner der drei CDs mit Soundtrack zum Film »Genesis« sind Renate Stürmer, Zweibrücken; Berthold Hajen, Boppard; und Roland Jung, Bischofsheim.

Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet »Mathematik« jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

Vom Sinn der Homosexualität

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

Gleichgeschlechtliche Partnerschaften sind keine Sackgasse der Evolution, sondern der soziale Kitt vieler Tiergemeinschaften.

Von Joan Roughgarden

Es war im Juni 1997, als ich zum ersten Mal bei der »Gay Pride Parade« mitmarschierte, dem jährlichen Umzug von Schwulen und Lesben durch die Innenstadt von San Francisco. Ich hatte schon einige solche Demonstrationen gesehen, aber dieses Spektakel war einzigartig. Auf den Straßen und Bürgersteigen drängten sich die Massen. Damals erschien mir mit einem Mal plausibel, was ich davor immer bezweifelt hatte: dass einer unter zehn Menschen homosexuell sein soll.

Mich als Biologin stellte ein so hoher Anteil von Lesben und Schwulen vor ein Problem – besteht doch der Sinn des Sexualkontakts in der Fortpflanzung. So jedenfalls hatte es mich mein Fach gelehrt. Homosexualität sei als Anomalie zu betrachten, für die es noch keine rechte Erklärung gebe. Nur: Wie kommt es dann, dass sich so viele Menschen zum eigenen Geschlecht hingezogen fühlen? »Nun ja, die haben eben einen Defekt«, könnte man erwidern. »An irgendeinem Punkt in ihrer Entwicklung oder während der Erziehung ist etwas schief gelaufen und hat ihre sexuellen Vorlieben in die falsche Richtung gelenkt.« Wenn das stimmt, wären Homosexuelle nur eine vorübergehende Laune der Natur: Geiltriebe im Stammbaum des Lebens, die nur so lange sprießen, bis die natürliche Selektion gründlich auslichtet – zu Gunsten von besser angepassten Artgenossen.

Dieses Problem ließ mich nicht mehr los, und ich begann, über das evolutionäre Rätsel der Homosexualität nachzudenken. Wenn aus einer Theorie folgt, dass mit derart vielen Menschen etwas nicht stimmt, könnte es dann nicht vielleicht eher die Theorie sein, mit der etwas nicht stimmt? Damals fürchtete ich, das Rätsel nicht mehr lösen zu können. Es waren nur noch wenige Monate bis zu meiner lange geplanten Geschlechtsumwandlung vom Mann zur Frau. Meine Zukunft erschien ungewiss. Ich sah mich schon von meinem Lehrstuhl an der Stanford-Universität fliegen und als Kellnerin in einer Transsexuellen-Bar arbeiten. So schlimm kam es zum Glück nicht: Ich wurde nicht gefeuert, sondern nur von allen Verwaltungspflichten entbunden. Und so hatte ich auf einmal reichlich Zeit zu ergründen, wieso die Evolution so viele Spielarten an Geschlechtern und so mannigfaltige Formen der Sexualität hervorgebracht hat.

Nach Schätzungen fühlen sich zehn Prozent der Menschen zum eigenen Geschlecht hingezogen. Generell ist Homosexualität im Tierreich viel zu häufig, um ein Irrtum der Natur zu sein.

Darwins Irrtum

Diese Forschungen machten mich schließlich zur Häretikerin in meinem Fach. Ich entdeckte, dass die Evolutionstheorie mit einem schweren Schönheitsfehler behaftet ist, der bis auf ihren Begründer zurückgeht. Nachdem Darwin erkannt hatte, wie Variation und Selektion zusammenwirken, um dem jeweils tauglichsten Exemplar einer Spezies Überleben und Fortpflanzung zu sichern, stellte sich ihm das Problem des Pfauenschwanzes und ähnlichen männlichen Zierrats: Er ist ausgesprochen hinderlich und ganz sicher nicht geeignet, die Tauglichkeit seines Trägers für den Daseinskampf zu erhöhen. Warum also wurde er im Zuge der Evolution nicht ausgemerzt?

Als Antwort auf diese Frage entwickelte Darwin seine Theorie der sexuellen Selektion. Demnach hat sich der Pfauenschwanz deshalb durchgesetzt, weil Weibchen ihn für einen sichtbaren Fitnessbeweis halten – schließlich ist sein Träger trotz dieser Behinderung am Leben geblieben. Folglich geben sie Männchen mit der imposantesten Zierde bei der Begattung den Vorzug.

Heute bin ich überzeugt davon, dass diese Theorie grundlegend falsch und auch durch Nachbessern nicht zu retten ist. Zwar geben viele Biologen inzwischen zu, dass neuere Erkenntnisse über Geschlecht und Sexualität Darwins Annahmen in Frage stellen, aber nur wenige plädieren wie ich dafür, das ganze Konzept fallen zu lassen. Lassen Sie mich beschreiben, wie ich zu dieser zugegebenermaßen drastischen und provokativen Schlussfolgerung gekommen bin – und mit ihr zu einem, wie ich finde, besseren Verständnis der Biologie von Sexualität und Geschlecht.

Darwin behauptet, dass die Weibchen diejenigen Männchen wählen, die ansehnlich, kräftig und wehrhaft sind – ähnlich wie ein Geflügelzüchter aus seiner Geflügelschar die prächtigsten Hähne aussucht. Von wenigen Ausnahmen abgesehen, sei das männliche Geschlecht das leidenschaftliche, das weibliche hingegen das schüchterne. Laut dem Urvater der Evolutionstheorie lassen sich Männchen und Weibchen fast durchweg in diese vorgestanzten Rollen einordnen: hier die ansehnlichen Recken, die stets die Initiative ergreifen, dort die zarten Fräulein, welche die dargebotene Auswahl besonnen begutachten.

Doch die Wirklichkeit sieht oft anders aus. Bei vielen Arten, einschließlich uns Menschen, sind die Damen keineswegs passiver als die Herren der Schöpfung, und nicht alle sehnen sich nach einem Arnold Schwarzenegger. Nicht selten umwerben Weibchen die Männchen, und genauso oft verweigern sich diese den Avancen ihrer Artgenossinnen. Bei vielen Spezies sind die Geschlechterrollen sogar vertauscht. Schon Darwin kannte die Blatthühnchen, bei denen die Weibchen ein prächtiges, die Männchen dagegen ein unscheinbares Federkleid tragen. Die Partnerwahl dieser Watvögel läuft denn auch genau umgekehrt ab wie die der Pfauen.

Bei manchen Tierarten ist die fein säuberliche Unterteilung in zwei Geschlechter sogar schlicht unmöglich. So sind ein Drittel aller Fische, die einen Schnorchler an einem tropischen Korallenriff umschwärmen, so genannte simultane oder sequenzielle Hermaphroditen. Erstere produzieren zur selben Zeit Eier und Spermien, Letztere wechseln im Laufe ihres Lebens sogar ihr Geschlecht. In der Tat sind die meisten mehrzelligen Organismen, einschließlich der Pflanzen, darauf ausgelegt, männliche und weibliche Keimzellen zu bilden. Der Zustand, in dem sich ein Individuum eindeutig einem Geschlecht zuordnen lässt, ist somit keineswegs die Norm.

Geschlechtsverkehr als Mittel zur Pflege von Beziehungen

Zudem gibt es bei einigen Arten mehr als nur jeweils einen Typus von Weibchen oder Männchen. In diesen Fällen haben zum Beispiel die verschiedenen Vertreter des männlichen Geschlechts nur eins gemeinsam: Sie produzieren Spermien. Dagegen weichen sie in Körpergröße, Färbung, Morphologie, Verhalten und Lebensweise so stark voneinander ab, dass ein unerfahrener Naturforscher versucht wäre, sie als verschiedene Arten zu klassifizieren. Dasselbe gilt für diverse Typen von Weibchen, deren einzige Gemeinsamkeit darin besteht, Eizellen zu produzieren. Ein Beispiel dafür sind gelb- und orangekehlige Seitenfleckenleguane, die Eier verschiedener Größe legen.

Zur Unterscheidung von den biologischen Geschlechtern möchte ich diese Varianten als »soziale Geschlechter« bezeichnen. Bei den Männchen der Sonnenbarsche zum Beispiel gibt es drei davon – ich nenne sie »Boss«, »Assistent« und »Abstauber«. Die Bosse, groß und mit orangefarbenem Bauch, überlassen es den kleineren Assistenten, die mit ihren dunklen Streifen den Weibchen ähneln, die Damen in Stimmung zu bringen und zur Eiablage zu bewegen. Sie selbst befruchten dann die meisten Eier, gestehen ihren Helfern aber einen gewissen Anteil zu. Währenddessen lauern die Abstauber klein und unscheinbar zwischen Wasserpflanzen und warten auf ihre Gelegenheit. Sobald ein Weibchen unbeobachtet Eier legt, schießen sie aus ihrem Versteck und schütten ihr Sperma darüber aus. ▷

▼ Um den Pfauenschwanz (unten) zu erklären, entwickelte Darwin seine Theorie der sexuellen Selektion, wonach die eher unscheinbaren Weibchen auf die prunkvollsten Männchen abfahren, weil sie in deren Prachtentfaltung den Ausweis hoher Fitness sehen. Bei Blatthühnchen (oben) ist die Rollenverteilung jedoch genau umgekehrt.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.



▷ Darwins Theorie der sexuellen Selektion beruht in einem weiteren Punkt auf falschen Annahmen: Bei Arten mit einem sozialen Gefüge – insbesondere also bei Vögeln und Säugetieren – dient die Paarung oft gar nicht primär dazu, Spermien zu übertragen. Vielmehr geht es hauptsächlich darum, Beziehungen zu knüpfen und zu pflegen, die sich vielleicht später einmal auszahlen – bei der Aufzucht von Nachkommen etwa. Das wird deutlich, wenn man die Zahl der Geschlechtsakte und der Neugeborenen ins Verhältnis setzt. Stellen wir uns ein Ehepaar vor, das seit dreißig Jahren verheiratet ist, zwei Kinder hat und regelmäßig miteinander schläft – sagen wir, zweimal in der Woche. Demnach hatten die beiden bisher 3000 Mal Geschlechtsverkehr, woraus ihnen zwei Kinder erwachsen sind. Macht 1500 Geschlechtsakte pro Kind. Das klingt nicht sonderlich effektiv. Ist es aber, wenn wir davon ausgehen, dass der regelmäßige Sex das Ehepaar lange genug zusammengehalten hat, um zwei Kinder großzuziehen. Ob wir Primaten betrachten oder Vögel: Sex findet vielfach an Orten und zu Zeiten statt, die es von vornherein unwahrscheinlich machen, dass daraus Nachkommen hervorgehen.

Theorie der sozialen Selektion

Darwins Theorie der sexuellen Selektion geht also von völlig falschen Prämissen aus. Das soziale Gefüge im Tierreich resultiert aus dem Bestreben der Individuen, sich die Ressourcen für eine erfolgreiche Reproduktion zu sichern. Dazu gehören Nahrung und Nistplätze, aber natürlich auch geeignete Partner. Diese Ressourcen kann ein Tier dann unmittelbar nutzen oder als Verhandlungsmasse einsetzen, um sich die Hilfe anderer zu erkaufen. Die soziale Dynamik von Tiergesellschaften dreht sich entscheidend darum, mit welchen Artgenossen des eigenen und des anderen Geschlechts man Freundschaft schließt oder kooperiert. Je nach dem Muster dieses Beziehungsgeflechts bilden sich unterschiedliche Familien- und Gruppenstrukturen.

Mit diesem Ansatz, den ich die Theorie der sozialen Selektion nenne, lässt sich die Vielfalt an Sexualpraktiken zwanglos erklären. Wie wir bereits gesehen haben, schert sich das Sozialleben der Sonnenbarsche keinen Deut um das, was Darwins Theorie der sexuellen Selektion unterstellt. Weder halten die Weibchen nach männlichen Partnern mit besonders guten Genen Ausschau noch versuchen die Männchen ihren Angebeteten vorzumachen, ihre genetische Ausstattung sei besser als die des Nachbarn. Worum es tatsächlich geht, sind Machtspiele um die Ressourcen für die eigene Reproduktion.

Ich bin überzeugt, dass das Verhalten dieser Fische eine Art Partnervermittlungssystem darstellt. Während der Boss damit beschäftigt ist, sein Territorium abzustecken und zu verteidigen, bandeln seine Assistenten schon mal mit den Weibchen an, wobei ihnen möglicherweise ihre feminine Färbung hilft. Als Gegenleistung dafür dürfen sie dann auch ein paar Eier befruchten. Bosse, denen keine Männchen als Assistenten zur Seite stehen, haben bei der Reproduktion deutlich weniger Erfolg.

Welche Aspekte ihrer Beziehungen Tiere durch ihr Paarungsverhalten regeln, hängt vom jeweiligen sozialen System ab. Wie die Anthropologin Sarah Hrdy von der Universität von Kalifornien in Davis herausfand, kopulieren zum Beispiel Affenweibchen in Indien mit möglichst vielen Männchen, damit keines ausschließen kann, dass es der Vater ist. Dieses Paarungsverhalten kontrolliert nicht nur die Macht der Stärkeren, sondern fördert auch den emotionalen Zusammenhalt der Gruppe und stellt sicher, dass die Affenväter ihren Teil zur Aufzucht der Jungen beitragen, statt sie zu verjagen oder gar zu töten.

Die Theorie der sozialen Selektion erklärt auch ein Rätsel, das schon Aristoteles beschäftigte: den »Penis« weiblicher Tüpfelhyänen. Die Klitoris der Tiere ist zu einem stattlichen, penisähnlichen Gebilde vergrößert, und Fetteinlagerungen in der umliegenden Haut ahmen einen Hodensack nach. Weibchen erigieren dieses Organ im Laufe des Tages viele Male beim Kontakt mit ihresgleichen. Für ein solches Unikum, das bei der Partnerwahl keinerlei Rolle spielt, hat die Theorie der sexuellen Selektion keine Erklärung. Ich bin überzeugt, dass eine weibliche Hyäne ohne »Penis« aus den Cliquen der Weibchen ausgeschlossen würde, welche über die Ressourcen zur Reproduktion bestimmen. Dies ist ein Beispiel für etwas, das ich »Dazugehörigkeitsmerkmal« nenne: Es verschafft seinem Träger Zugang zu einer sozialen Gruppe – unabhängig davon, ob es ihm sonst einen Nutzen bringt. Ein solches Merkmal ist möglicherweise auch das menschliche Gehirn mit seiner Fähigkeit zu Konversation, Musik und bildender Kunst.

Ein weiteres Beispiel dürfte der gleichgeschlechtliche Sex bei den weiblichen Bonobos (Zwergschimpansen) sein, bei dem die Tiere

Viele Meerestiere ändern im Laufe des Lebens ihr Geschlecht. Hier ist eine männliche Geister-Muräne (blau) gerade dabei, sich in ein Weibchen (gelb) zu verwandeln.

Aus urheberrechtlichen Gründen können wir Ihnen die Bilder leider nicht online zeigen.

von vorne ihre Genitalien aneinander reiben. Ich bin sicher, dass Weibchen, die sich nicht an diesem regelmäßigen »Rubbing« beteiligen, keine Chance haben, in die Kreise hineinzukommen, die den Zugang zur Nahrung kontrollieren oder den nötigen Schutz für die erfolgreiche Aufzucht von Nachwuchs bieten.

Zutritt zu den Zirkeln der Macht

Vor diesem Hintergrund erscheinen sogar klassische Geschlechtsattribute wie Pfauenschwanz und Hirschgeweih in anderem Licht. Möglicherweise sollen sie gar nicht die Weibchen von den Vorzügen ihrer Besitzer überzeugen, sondern die männlichen Geschlechtsgenossen beeindrucken. Vielleicht fungieren auch sie als Mitgliedsausweis, der seinem Besitzer Zutritt zu den Zirkeln der Macht verschafft. Meines Wissens gibt es bisher keine Experimente zur Klärung der Frage, was ein sekundäres Geschlechtsmerkmal wirklich ist: Prunkstück oder Zugangsberechtigung. Untersucht wurde nur, wie die Veränderung eines Merkmals, etwa die Farbe des Gefieders, die Partnerwahl beeinflusst. Genauso interessant wäre aber zu wissen, wie sie sich auf gleichgeschlechtliche Beziehungen auswirkt, insbesondere auf die Mitgliedschaft in Gruppen mit sozialer Macht.

Damit bin ich zurück bei meinem Ausgangsproblem: dem Rätsel der Homosexualität. Bruce Bagemihl, ehemals Linguist und Kognitionsforscher an der Universität von British Columbia in Vancouver, hat in seinem Buch »Biological Exuberance: Animal Homosexuality and Natural Diversity« (»Biologischer Luxus: Homosexualität und Diversität im Tierreich«) mehr als dreihundert Wirbeltierarten zusammengetragen, bei denen es regelmäßig zum Genitalkontakt zwischen Vertretern desselben Geschlechts kommt. Bei manchen Spezies wie den Bonobos sind homosexuelle Paarungen genauso häufig wie heterosexuelle. Bei anderen machen sie dagegen nur ein bis zehn Prozent aller Geschlechtsakte aus. Teils ist auch nur eines der beiden Geschlechter homosexuell aktiv. Manche gleichgeschlechtlichen Sexualkontakte sind an jahrelange Beziehungen geknüpft, andere an kurzlebige Bündnisse. Die weite Verbreitung der Homosexualität unter Wirbeltieren – sofern sie überhaupt genetisch bedingt ist – spricht jedenfalls dafür, dass es sich nicht um eine seltsame Abweichung handelt, von der zufällig ein paar Spezies betroffen sind, sondern um ein Merkmal, das evolutionäre Vorteile mit sich bringt.

Auch beim Menschen ist Homosexualität viel zu häufig, um ein genetischer Defekt zu sein. Echte Erbleiden sind nämlich – je nach ihrem Schweregrad – sehr bis extrem selten. Eine genetisch bedingte Störung, die tödlich verläuft, kann nicht vererbt werden, sondern muss in jeder Generation durch neue Mutationen frisch entstehen. Ihr Auftreten entspricht damit der natürlichen Mutationsrate, also etwa eins zu einer Million. Eine Krankheit, welche die Zahl der Nachkommen – die so genannte reproduktive Fitness – um zehn Prozent senkt, wäre mit einem unter 100 000 Fällen bereits zehnmal so häufig zu beobachten. Nach derselben Logik käme ein Leiden, das eine Fitness-Einbuße von nur einem Prozent mit sich bringt, wiederum zehnmal so oft vor. Angenommen, jeder zehnte Mensch sei homosexuell. Dann betrüge die durchschnittliche Einbuße an Nachkommen 0,001 Prozent, was statistisch nicht messbar ist.

Ich gehe sogar so weit zu behaupten, dass Homosexualität überhaupt keinen Fitnessverlust mit sich bringt. Über die Geschichte und kulturelle Grenzen hinweg zeigt sich, dass homoerotische Neigungen keineswegs sexuelle Beziehungen zum anderen Geschlecht ausschließen. Es gibt keine wirklichen Belege dafür, dass es Personen, die sich zu ihresgleichen hingezogen fühlen, in ihrer Gesamtheit eine geringere reproduktive Fitness haben als Heterosexuelle. Schließlich bleiben auch viele Menschen, die ausschließlich heterosexuell leben, kinderlos.

Worin liegt also der evolutionäre Nutzen der Homosexualität? Er ist vielfältig – ähnlich dem unserer Fähigkeit zu sprechen. Durch gleichgeschlechtlichen Verkehr lassen sich Freude und Vergnügen mitteilen. Außerdem kann Homosexualität, wie wir gesehen haben, ein Dazugehörigkeitsmerkmal sein, das in Gemeinschaften Zugang zu sozialen Gruppen verschafft. In der Evolution entsteht sie, wie ich meine, immer dann, wenn es zwei gleichgeschlechtlichen Partnern Vorteile bringt, sich zusammenzutun: etwa um ihr Überleben zu sichern, Partner zur Fortpflanzung zu finden oder den Nachwuchs zu beschützen.

So unterschiedlich wie die Tierarten und Geschlechter sind die Spielarten der gleichgeschlechtlichen Kooperation. Den Bonobo-Weibchen garantiert sie Geborgenheit in der Gruppe und die Nahrung, um ihren Nachwuchs durchzubringen. Männlichen Steppenpavianen und wohl teils auch Walen verhilft sie zu den Verbündeten, die sie brauchen, um potenziell tödliche Auseinandersetzungen zu überstehen und sich später mit einem Weibchen paaren zu können. Generell fördert sie den Zusammenhalt zwischen den Gruppenmitgliedern: Homosexualität ist der Kitt für soziale Zusammenschlüsse, die entscheidend zum Lebenserfolg beitragen. ◁

Bonobo-Weibchen reiben oft ihre Geschlechtsteile aneinander (unten). Bei ihnen scheint Homosexualität als Eintrittskarte zu den einflussreichen Zirkeln zu fungieren. Ein solches Dazugehörigkeitsmerkmal ist wohl auch der Pseudo-Penis der weiblichen Tüpfelhyänen (oben).

AUTORIN



Joan Roughgarden lehrt Biologie an der Standford Universität in Kalifornien. Im vergangenen Jahr ist bei der University of California Press ihr Buch »Evolution's Rainbow: Diversity, Gender and Sexuality in Nature and People« erschienen.

Neue Menschenart entdeckt?

Vor zwanzigtausend Jahren lebte auf der indonesischen Insel Flores ein zwergwüchsiger, vermutlich ursprünglicher *Homo*, der Zwergelefanten jagte. Am schwersten an dem Sensationsfund zu erklären ist, wieso diese frühen Menschen ein so kleines Gehirn besaßen

KAZUHIKO SANO

WEITERE THEMEN IM MÄRZ

100 Jahre Relativitätstheorie

In seinem »Annus mirabilis« legte Einstein 1905 die Grundlagen der Quantenmechanik und der Theorie der Raumzeit. Eine Serie von Interviews zu dem Jubiläum soll zeigen, was aus seinen Ideen heute geworden ist



LENNART NILSSON

Ein übersehenes genetisches Programm

Im angeblichen DNA-Schrott verbergen sich Informationen, die vermutlich erst die Entwicklung komplexer Lebewesen bis hin zum Menschen ermöglichten



MADD COLLINS

Droht ein Klimaumsturz?

Offenbar existieren Schwellenwerte, bei deren Überschreiten das Klima kippt und einen völlig anderen Zustand annimmt. In der Vergangenheit sind solche dramatischen Umschwünge mehrfach aufgetreten



ALFRED T. KAMAJIAN

Wirbel im Kosmos

Ob Quasare, Galaxien oder junge Sterne – sie alle enthalten ein grundlegendes Strukturelement: Spiralen, in denen Materie um ein Massezentrum rotiert. Wie erklärt sich ihre Allgegenwart?